

N O T I C E

THIS DOCUMENT HAS BEEN REPRODUCED FROM
MICROFICHE. ALTHOUGH IT IS RECOGNIZED THAT
CERTAIN PORTIONS ARE ILLEGIBLE, IT IS BEING RELEASED
IN THE INTEREST OF MAKING AVAILABLE AS MUCH
INFORMATION AS POSSIBLE

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES

JOINT
RESEARCH
CENTRE



ISPRA ESTABLISHMENT

RECEIVED

OCT 8 1980

SIS/9026

HCM-025

Type II

(E80-10228) THE INFLUENCE OF TOPOGRAPHIC
STRUCTURES ON NIGHT-TIME SURFACE
TEMPERATURES: EVALUATION OF A SATELLITE
THERMAL IMAGE OF THE UPPER RHINE PLAIN AND
THE SURROUNDING HIGHLANDS (Freiburg Univ.)

N80-33829

Unclas
G3/43 00228

NEWSLETTER

17

TELLUS PROJECT

80-10228
CR-1635-43

... available under NASA sponsorship
... interest of early and wide dis-
... of Earth Resources Survey
... information and without liability
... use made thereof."

**DER EINFLUSS TOPOGRAPHISCHER STRUKTUREN AUF DIE
NACHTLICHEN OBERFLACHENTEMPERATUREN: AUSWERTUNG
EINER SATELLITEN-THERMALAUFNAHME DER OBERRHEINEBENE
UND IHRER RANDGEBIRGE**

**(The Influence of Topographic Structures on Night-Time Surface Temperatures:
Evaluation of a Satellite Thermal Image of the Upper Rhine Plain and the
Surrounding Highlands)**

by . Hermann Gossmann

Geographisches Institut I der Universität Freiburg (GEOIF)
D - 7800 Freiburg i. Br.

Original photography may be purchased from
EROS Data Center

Sioux Falls, SD

57198

Correspondence regarding this series of newsletters should be addressed to:

P. REINIGER

*Commission of the European Communities
JOINT RESEARCH CENTRE
I-21020 Ispra (Varese) - Italy*

SUMMARY

AEM-A or HCMM (= Heat Capacity Mapping Mission) is the first civilian recording system designed to register the temperature especially of land surfaces from space. It is, at the same time, the first satellite for the purposes of the earth sciences with a geometric resolution below 1 km (at nadir 600 m) in the thermal channel (10,5 - 12,5 micrometers), and whose orbit is sun-synchronous, close to the pole and designed to register the maximum and minimum surface temperatures of a day. It passes over the mid-latitudes of the Northern Hemisphere at about 1.30 pm and 2.30 am.

The possibility of registering the spatial distribution of surface temperatures, their daily amplitude and the so-called inertia which is derived from it, is the basis for a variety of applications ranging from the discrimination of different types of rock, the analysis of soil moisture and the water supply of cultivated plants to the introduction of surface temperature as a parameter in heat budget deliberations.

Many of these research projects may not be feasible in the Middle-European area because of its complexity, its different types of topography and the many overlapping factors which influence surface temperatures. But even if we merely succeed in evolving a description of the thermal behaviour of various physiotopes and environmental units in a regional scale and in representing this information spatially on maps, then this can be regarded as an important contribution to classic climatological and environmental research in the mesoscale.

The first step in pursuit of this objective is to investigate which structures are identified by the HCMM and which topographic features produce a signal in HCMM data. The question to what scale the enlargement and resolution of HCMM images can sensibly be practised is also relevant.

The data base for this investigation is provided by a section of an HCMM image taken on 5/30/78, at 3.13 MEZ = 2.13 GMT (scene A-A 0034-02130-3) (cf Fig. 1). It encompasses the Upper Rhine Valley between Basel and Frankfurt and the surrounding highlands.

The rectification of this segment with respect to Gauss-Krüger coordinates and the adaption of individual sections to the corresponding sheets of the official topographical map 200,000 of the Federal Republic of Germany, the "Topographische Übersichtskarte 1:200 000" (TUK 200) as described in GOSSMANN and HABERÄCKER 1980, was prerequisite.

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

1. Geometric Resolution and Suitable Map Scales

Under the assumption that the minimum diameter of map elements in thematic and topographic maps is 0,3 mm, the geometric resolution of the VHRR (Very High Resolution Radiometer) of the HCMM of 600 m corresponds to the scale 1: 2,000,000. For this reason, we were somewhat sceptical whether an enlargement to the scale of the TUX 200 and the superimposition of the enlarged image with the various levels of information provided by this map would lead to an increase in knowledge.

The material presented in this study shows that HCMM harbors an abundance of information which is only revealed by means of this kind of processing. This is especially true of the correlation between surface temperatures and the water network as well as of the relationship between surface temperatures and the settlement pattern.

However, we should note that the resolution of the HCMM is not sufficient to determine the boundaries of various geographic units or to establish the exact limits of topographic structures by means of the HCMM image. The comparison of the airborne thermal image in Fig. 16e with the corresponding sections of Figs. 16a,b,c and d shows this very clearly.

Nevertheless, it is essential to state that the thermal pattern of an HCMM image at this scale can be related to and explained by topographical structure.

2. Night-time Surface Temperatures and Relief

A well-known rule of topoclimatology is the thermal tripartition of hilly or mountainous areas at night: cold elevations, warm slopes and cold valley bottoms. The data allows us to test the applicability of this law to the behaviour of surface temperatures in various spatial dimensions.

In general, only the difference between cold valleys and lowlands on the one hand, and warm slopes and mountain tops on the other, could be verified. Valleys are considerably colder than slopes if covered by comparable vegetation. The water network which follows the valley systems is all but congruent with the distribution pattern of particularly cold surfaces (cf Fig. 20b). This applies not only to the valleys in the highlands carved to a depth of hundreds of metres, but also to differences in elevation amounting to less than one metre on the alluvial and diluvial plains of the Upper Rhine Valley (cf Fig.'s 10a and 16c).

Nevertheless, the elevated areas proved to be as warm as the slopes, in some cases even noticeably warmer (Soonwald, Pfälzer Wald, Westtaunus, edge of the Black Forest near Offenburg) in most of the image sections presented here. Cold elevated areas can be found in these samples only in places where one of the following three conditions is met:

1. Grassland and cultivated fields in altitude above forested slopes
2. Extended plateaux (cf Fig. 20a)
3. Extended surfaces in areas with small differences in elevation (cf Fig. 9b)

At the mesoscale, if we do not consider each mountain or valley individually, but designate the whole Upper Rhine Valley as the "cold lowland", the entire, strongly dissected highland fringe as the "warm slope" and the highland plateau which decline slightly towards the edges of the image, as the "cold elevation", we can establish virtual congruence between the model and reality.

3. Surface Temperatures and Forest Distribution

It is generally agreed that forests do not cool off as rapidly at night as do unforested areas and that they, consequently, produce higher surface temperatures at night than adjoining grassland or cultivated fields. Therefore, it is surprising that a much more complex picture resulted from this study:

1. Forests on steep slopes or convex terrain show very high temperatures (as warm as city centres).
2. All forests on the plateau of highlands display slightly lower temperatures but are definitely warmer than scattered clearings or adjoining unforested terrain. With the exception of the Upper Rhine Valley, the contrast between forested and unforested terrain is the most essential factor of the distribution of warm and cold surfaces everywhere, unless, of course the relief determines the thermal pattern.
3. In the Upper Rhine Valley, the picture is very complex. The residual forests on the holocene flood plain of the Rhine are depicted as being relatively warm but only in places where they have not lost their characteristic features due to the canalization of the Rhine River and the subsequent drop of the ground water level. The forests on the diluvial and alluvial fans in front of the Pfälzer Wald and the northern Vosges Mountains also seem to be warmer than their surroundings. On the other hand, most of the Hardt forests on the Rhine's quarternary accumulation plain and in part on the gravel fans of the rivers of the Black Forest, are as cold as, or even colder than, neighbouring unforested areas. This is most evident in the southern part of the Upper Rhine Valley north of Basel.

If you ignore the behaviour of the residual forest on the Rhine's holocene flood plain, a general tendency for great contrast between forested and unforested areas on convex landforms and for reduction of this contrast between the two

types of surfaces in concave terrain prevails. As we have stated repeatedly, the highest surface temperatures are found on forested mountain ridges and steep slopes.

There must be several reasons for the distinctive behaviour of forested surfaces.

1. The low surface temperature of the Hardt forests can only be understood if you assume that there is a relatively homogeneous layer of cold air extending beyond the actual height of the trees (inversion in the boundary layer).
2. The differing behaviour of forests on plateaux can then be explained by the fact that a sufficiently extended layer of inversion could not be created there because of stronger dynamic turbulences caused by winds at relatively high speeds. The sensible heat flux to the forested surfaces thus remains greater than on adjoining grassland and arable fields.
3. All this signifies that the much higher surface temperatures of forests at night cannot be attributed to, or at least not completely explained, by the capacity for heat storage within the forest but rather also by the sensible heat flux between the air and the forest.
4. The explanation for the relatively high temperature of the residual forests on the holocene flood plain of the Rhine can be derived from the fact that, on the one hand, a greater heat capacity is available below the surface of the forest because of numerous residual water bodies ¹⁾ and that, on the other hand, inversion in the boundary layer is interrupted or at least weakened, as in large cities.

4. Surface Temperatures of Settlements

It was to be expected that heat islands from large cities would be depicted in the HCMM image because of their high surface temperature. However, it became evident that much smaller settlements can evoke a signal, under favourable circumstances, down to a size of 2,000 inhabitants.

Prerequisites for this phenomenon are a densely built-up village centre and placement in a horizontal, unforested environment. Otherwise, the weak signal emitted by the settlement would be masked by other effects on the thermal pattern. Especially the thermal effect of such small villages situated in concave terrain is cancelled out by the influence of the relief.

1) These residual water areas were especially large and numerous at the time of the satellite overpass, as the Rhine had had a particularly high water level a few days earlier in May 1978.

However, not nearly all of the villages with the above-mentioned favourable conditions are represented by a warm spot on the HCMM image, as the recorded phenomena are very small with reference to the means provided by geometric as well as radiometric resolution. The effect is of the same magnitude as the random noises produced by VHRR. Thus it is possible that the heat island of a village can be simulated or suppressed in each individual case. At the same time, the identification of a village depends on whether its area is depicted in a single pixel or whether it is distributed on several picture elements. A signal on the thermal image can be expected only in the first case.

The situation is less equivocal when we consider larger villages, and smaller towns with an average size of approximately 10,000 inhabitants. These are clearly identified as heat islands by reason of their elevated surface temperature. The core area of every larger city with tens of thousands of inhabitants is registered as a heat island with temperatures a few degrees higher than its surroundings. The difference in temperature between the centres of cities such as Mannheim/Ludwigshafen (cf Fig. 12) and Strasbourg (cf Fig. 13) and their environments increases to over 4°C. The area of higher surface temperature extends beyond the urban built-up area to the surroundings because of the flow of warm air in the boundary layer. The suburban area is much warmer on the leeward than on the windward side of the cities.

5. Industrial Complexes

On comparing different industrial areas, it becomes apparent that different levels of energy consumption are identified on the thermal image even though it is impossible to quantify the respective heat emission of an automobile plant and a chemical factory from the difference in the temperature reading. It is difficult to interpret these readings definitively because the thermal image by itself cannot be used to establish decisively whether the high temperatures of chemical plants registered by the HCMM are really higher surface temperatures or whether they must be attributed to the masking effect of warmer exhaust gases containing aerosols.

6. Cold Air Reservoirs and Cold Air Streams

With reference to the problem of cold air accumulation in concave areas and its outflow from valleys, the following statements can be made:

1. The fact that broad and shallow valley expanses are generally depicted as cold areas independent of their surface coverage, supports the theory that the thermal image can identify areas in which cold air collects and either comes to rest or flows onward very slowly down the valley. By contrast, in narrow valley areas, those sections where cold air escapes quickly are

registered as warm areas. Furthermore, in contrast to cold air reservoirs, the areas in front of the mouths of valleys were nowhere registered as particularly cold areas. This signifies that basins accumulating cold air are depicted by the satellite thermal image, but that the route taken by the cold air and the extension of cold air at the mouth of a valley is ignored.

2. It is generally agreed that elevated grassland is the main producer of cold air and that it is prerequisite for the night-time streams of cold air at the mouths of valleys as grassland gets colder than adjoining forests. Our examples show, however, that extensively or completely forested areas can also create cold air accumulation.
Basically, this was to be expected. From the point of view of the heat budget, elevated forest areas with their higher surface temperatures must surely radiate more energy and thus the net radiation is even more negative than over grasslands. Therefore, forests have to withdraw a larger quantity of energy from the air via the sensible heat flux and so contribute substantially to the cooling of the air. Forests do not produce air that is as cold as that of grassland in corresponding locations but they produce it in greater quantities.

7. Comparison of Airborne and Satellite Thermal Images

There are several advantages for working with satellite thermal images as opposed to aerial IR-registrations. It is much easier to rectify a satellite image geometrically and to superimpose other levels of digitized information on it. An advantage for satellite thermal images is essentially based on the possibility of recording large areas almost simultaneously. The recording of an area the size of the Upper Rhine Valley would require hours using the planes currently available for civilian research and would result in data loaded with discrepancies caused by the time lag between the beginning and the end of the registration. Of course, if we are faced with the problem of clarifying the boundaries of areas with varying thermal behaviour with a degree of accuracy of less than 600 m, the actual satellite data cannot be used. Satellite data supplied the same information as aerial IR registrations with corresponding averaging for all studies requiring a survey of the thermal pattern within an area measuring 10 km x 10 km or more (cf Fig. 15), provided that sufficiently precise control points can be established for the purpose of geometric rectification in the surroundings of the area under discussion.

Generally, this does not present any problems in areas with a strong relief. Satellite thermal data are much more comprehensive than aircraft data for studies on a regional, rather than on a local scale, since air-borne thermal images often obscure the basic correlation in thermal patterns because of a variety of irrelevant topographical detail. Satellite thermal images certainly demonstrate the dependence of surface temperature on relief much more clearly than comparable air-borne thermal images.

Einleitung

Mit der AEM-Reihe (AEM = Applications Explorer Mission) hat die NASA nach der LANDSAT-Serie ein neues, für erdwissenschaftliche Forschung wichtiges Satellitenprogramm gestartet. AEM-A oder HCMM (= Heat Capacity Mapping Mission) ist das erste zivile Aufnahmesystem speziell für die Erfassung der Temperaturen von Landoberflächen aus dem Weltraum. Zugleich ist es der erste erdwissenschaftliche Satellit, der im thermalen Kanal ($10,5 - 12,5 \mu\text{m}$) eine geometrische Auflösung unter 1 km (im Nadir 600 m) besitzt und auf einer polnahen Umlaufbahn sonnensynchron so eingestellt ist, daß er näherungsweise die Extreme der Oberflächentemperatur im Tagesgang erfaßt. Er überfliegt die Mittelbreiten der Nordhalbkugel etwa 1 1/2 Stunden nach dem Sonnenhöchststand und etwa 2 1/2 Stunden nach Mitternacht.

Auf der neuen Möglichkeit der Registrierung der räumlichen Verbreitung der Oberflächentemperatur, ihrer Tagesamplitude und der daraus abgeleiteten sogenannten thermischen Trägheit gründet sich eine Vielzahl von Anwendungsvorhaben, die von der Trennung verschiedener Gesteine über die Untersuchung der Bodenfeuchte und der Wasserversorgung von Kulturpflanzen bis zur Einführung der Oberflächentemperatur als Parameter in Wärmehaushaltsbetrachtungen reichen.

Viele dieser Forschungsansätze sind im mitteleuropäischen Raum wegen seiner Kleinräumigkeit und Vielgestaltigkeit und wegen der zahlreichen, die Oberflächentemperatur mitbestimmenden und sich wechselseitig überlagernden Faktoren aussichtslos. Aber auch, wenn es nur gelingt, aus den neuen Satellitendaten eine Beschreibung des thermischen Verhaltens der verschiedenen Physiotope und Ökotope im regionalen Maßstab abzuleiten und in Karten flächenhaft darzustellen, ist dies als wichtige Ergänzung zu klassischen klimatologischen und ökologischen Untersuchungen im Mesoscale anzusehen.

Der erste Schritt bei der Verfolgung dieses Zieles und zugleich Voraussetzung für die Abgrenzung der Anwendbarkeit von HCMM-Aufnahmen bei weiteren Fragestellungen muß die Analyse des Informationsgehaltes einzelner HCMM-Aufnahmen sein. Es muß untersucht werden, welche Strukturen in den HCMM-Aufnahmen zur Abbildung kommen und welche Oberflächeneigenschaften ein Signal in den HCMM-Daten hervorrufen. Verbunden ist damit die Frage, bis zu welchem Maßstab die Vergrößerung und Auflösung der HCMM-Bilder betrieben werden kann.

In diesem Sinne wird im folgenden ein Ausschnitt der HCMM-Aufnahme vom 30. 5. 78, 3.13 MEZ (Szene A-A 0034-02130-3) untersucht (vgl. Abb.1). Er umfaßt die Oberrheinebene zwischen Basel und Frankfurt sowie die umliegenden Mittelgebirge.

Voraussetzung für diese Arbeit war die bei GOSSMANN und HABERÄCKER (1980) beschriebene Entzerrung dieses Ausschnittes auf Gauß-Krüger-Koordinaten und die Anpassung einzelner Teile an die entsprechenden Blätter der Topographischen Übersichtskarte 1 : 200 000 (TÜK 200).

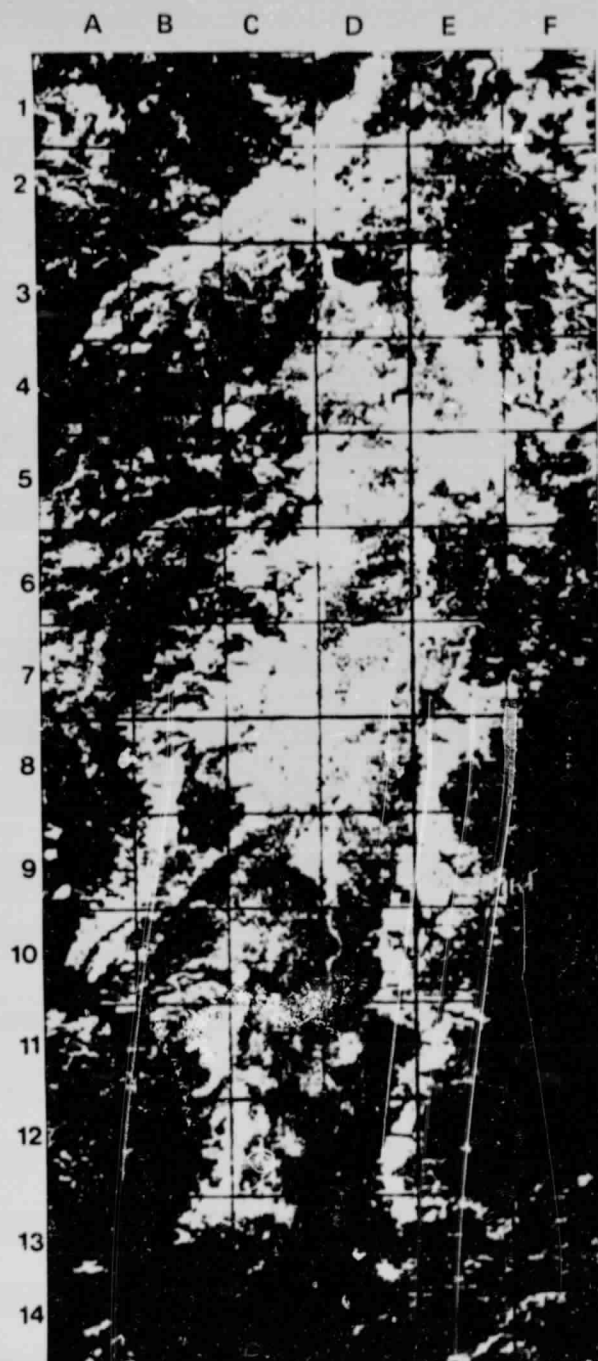


Abb. 1a: Ausschnitt aus der IR-Thermalaufnahme des HCMM-Satelliten vom 30.5.78, 2.13 GMT (= 3.13 MEZ). Der Ausschnitt zeigt die Oberrheinebene zwischen Basel und Frankfurt und die sie umgebenden Mittelgebirge (hell = warm, dunkel = kalt).

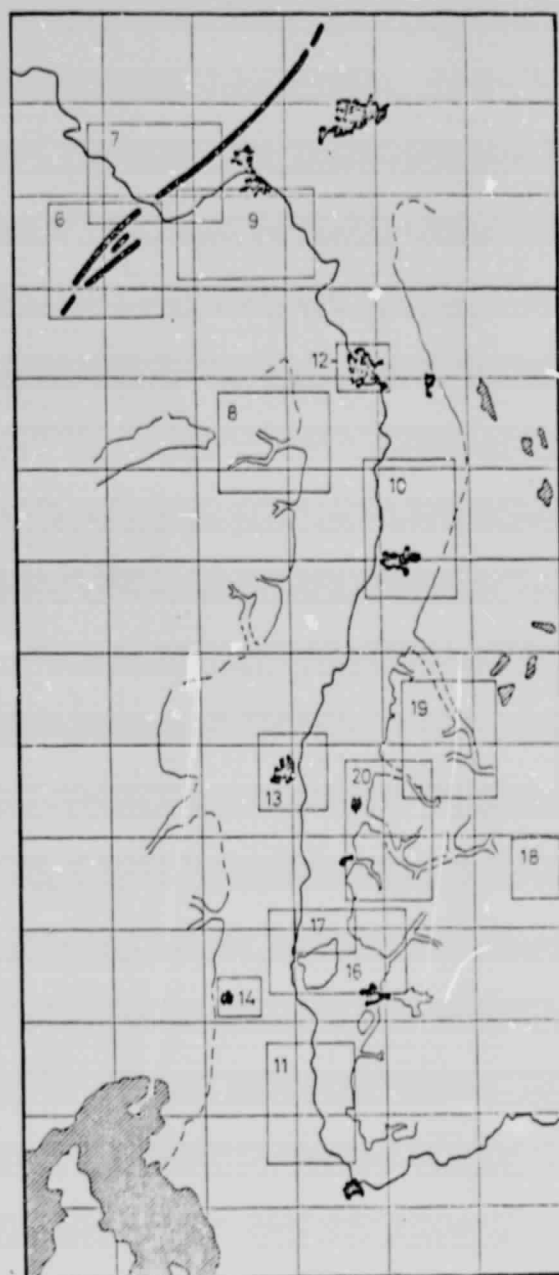


Abb. 1b: Übersichtsskizze der Oberrheinebene mit den Rändern der Mittelgebirge, einigen weiteren auffälligen Strukturen von Abb. 1a und den größeren Städten. Die schraffierten Flächen an der linken unteren Ecke und am rechten Bildrand stellen Wolken dar.

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

1. Wetterlage zur Zeit der Aufnahme

Mehrere der in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellten Sachverhalte werden ohne Kenntnis der Wetterlage zum Zeitpunkt der Aufnahme nicht verständlich. Darüber hinaus sind alle beschriebenen Zusammenhänge an die vorgegebene Wettersituation gebunden und können bei einer anderen Strahlungswetterlage sehr stark abgewandelt sein. Deshalb ist es nötig, eine Beschreibung der Wettersituation zum Aufnahmezeitpunkt an den Anfang zu stellen.

Die Wetterkarte vom 30.5.78, 00 GMT (Abb. 2a) zeigt Mitteleuropa im Einflußbereich eines Hochdruckgebietes mit Kern über der Nordsee und dem südlichen Teil der Ostsee. Dem entspricht der von der Stuttgarter Radiosonde (Abb. 2b) und von den Bergstationen Wasserkuppe (Rhön), Kleiner Feldberg (Taunus) und Feldberg (Schwarzwald) registrierte Ostwind in der unteren Troposphäre (vgl. Abb. 3, Höhenstationen).

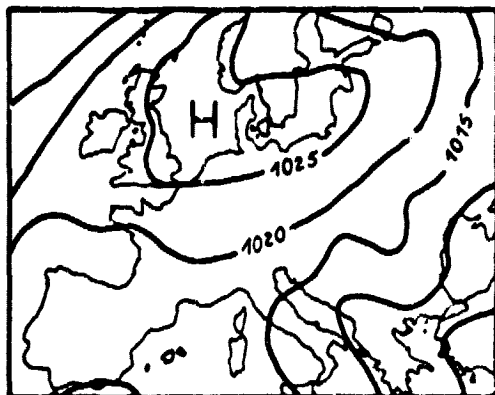


Abb. 2a: Luftdruckverteilung in Meeresspiegelhöhe am 30.5.78, 00 GMT.

Quelle: Europäischer Wetterbericht

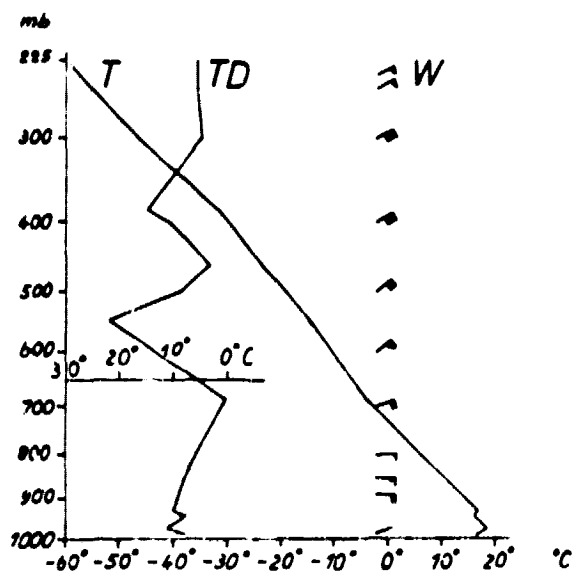


Abb. 2b: Radiosonde Stuttgart am 30.5.78, 00 GMT.
Temperatur T,
Taupunktdifferenz TD,
Wind W.

Unter diesem Ostwind war im mittleren Teil der Oberrheinebene eine flache, von Norden nach Süden gerichtete Bodenströmung ausgebildet (vgl. Abb. 3, Stationen Mannheim, Karlsruhe, Rastatt und Straßburg). Nach den Daten des Meßmastes

Höhenstationen des Deutschen Wetterdienstes

Wasserkuppe (Rhön, 921 m)	90°	7,3 m/sec
Kl. Feldberg (Taunus, 805 m)	90°	4,6 m/sec
Feldberg (Schwarzwald, 1495 m)	120°	10,6 m/sec

Stationen in der Oberrheinebene

Frankfurt/Main (Flugwetterwarte)	70°	2,1 m/sec
Mannheim WA	340°	1,9 m/sec
Karlsruhe WA	360°	1,2 m/sec
Rastatt (LfU)	30°	3,0 m/sec
Straßburg-Entzheim (F)	320°	2,0 m/sec
Colmar-Meyenheim (F)	20°	3,0 m/sec
Bremgarten (Geophys)	umlaufend	0 - 1,5 m/sec
Basel-Mulhouse (F)	160°	1,0 m/sec

Stationen am Rande der Oberrheinebene

Neustadt/Weinstraße	260°	1,2 m/sec
Darmstadt (in 64m Höhe)	50°	4,0 m/sec

Meßmast KFZ Karlsruhe (10-Minuten-Mittel, 3.20 MEZ)

40 m	13°	1,6 m/sec
100 m	34°	2,1 m/sec
200 m	72°	4,6 m/sec

Abb. 3: Windregistrierungen zum Zeitpunkt der HCMM-Aufnahme (Stundenmittel für den 30.5.78, 3 - 4 Uhr MEZ)

Abkürzungen:

WA	Wetteramt des Deutschen Wetterdienstes
LfU	Landesanstalt für Umweltschutz Karlsruhe
KFZ	Kernforschungszentrum Karlsruhe
F	Région Météorologique Nord-Est, Frankreich
Geophys	Geophysikalischer Dienst der Bundeswehr

Allen diesen Institutionen sei für die Bereitstellung der Daten gedankt.

des Kernforschungszentrums Karlsruhe (Abb. 3 und 4) erfaßte diese meridionale Strömung nur die untersten Dekameter. In 200 m Höhe dominierte bereits die zonale Komponente (72° , 4,6 m/sec). Im Rhein-Main-Gebiet reichte diese bis zum Boden (Frankfurt/Main Flugwetterwarte 70° , 2,1 m/sec). In der südlichen Oberrheinebene bestand keine einheitliche Windrichtung (Bremgarten umlaufender Wind, maximal 1,5 m/sec; Basel-Mulhouse 160° , 1,0 m/sec).

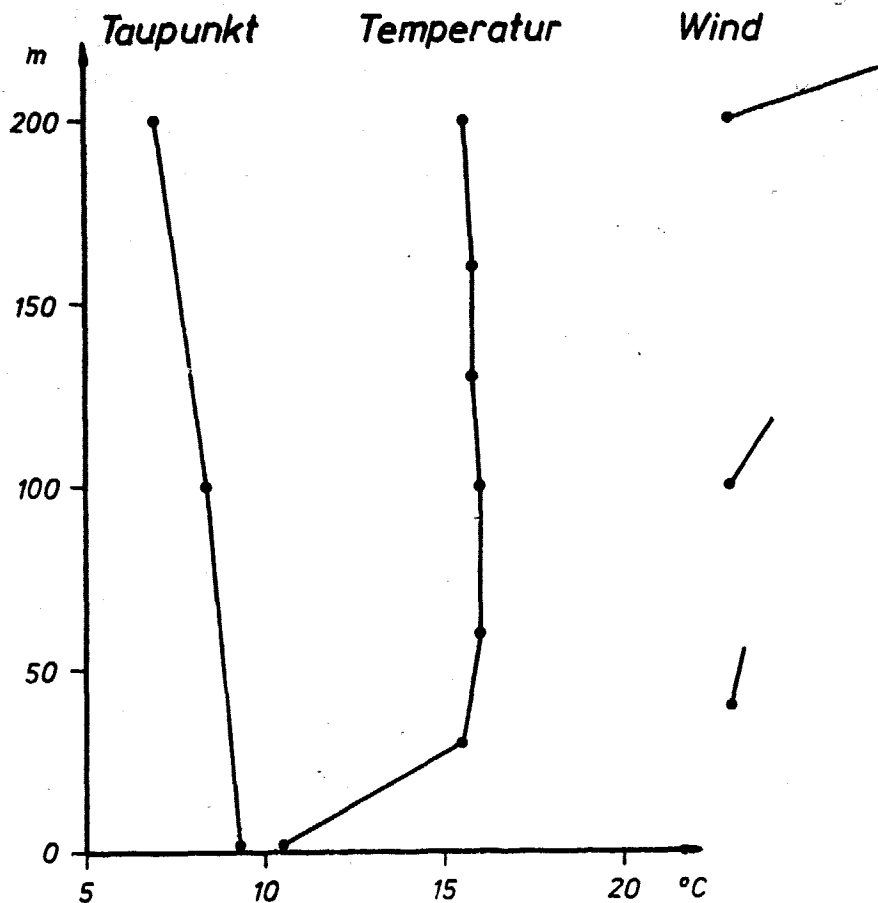


Abb. 4: Vertikalprofile der Temperatur, des Taupunktes und des Windes nach den Meßdaten am Mast des Kernforschungszentrums Karlsruhe vom 30.5.78, 3.20 MEZ.

Temperatur: 2m $10,5^\circ\text{C}$, 30m $15,5^\circ\text{C}$, 60m $16,0^\circ\text{C}$,
100 m $16,0^\circ\text{C}$, 130m $15,8^\circ\text{C}$, 160m $15,8^\circ\text{C}$,
200 m $15,6^\circ\text{C}$.

Taupunkt: 2m $9,3^\circ\text{C}$, 100m $8,2^\circ\text{C}$, 200m $7,0^\circ\text{C}$.

Wind: Siehe Abb. 3.

Nach den Werten des Kernforschungszentrums Karlsruhe (Abb. 4) war dort in der untersten Schicht zwischen 2 und 30 m Höhe eine kräftige Bodeninversion ausgebildet ($\Delta t = 5^{\circ}$). Dabei bestand in der bodennahen Luft ein sehr kleines Sättigungsdefizit (Lufttemperatur $10,5^{\circ}\text{C}$, Taupunkt $9,3^{\circ}\text{C}$). Das zeigt, daß mit dem Auftreten von Bodennebelfeldern gerechnet werden muß.

In den höheren Schichten traten sehr verschiedene Sättigungsgrade auf. Zwischen sehr trockener Luft im 550 mb-Niveau mit einer Taupunktdifferenz von mehr als 20°C und ebenfalls trockener Luft in der unteren Troposphäre (Taupunktdifferenz $5 - 10^{\circ}\text{C}$) stieg die relative Feuchte im 700 mb-Niveau auf 100 % (Taupunktdifferenz 0°). Zu dieser Schicht gehören die Wolken, die in der linken unteren Ecke und am rechten Rand von Abb. 1a zu sehen sind.

2 Oberrheinebene und Randhöhen im Überblick

Jeder mit der Geographie Mitteleuropas auch nur einigermaßen vertraute Betrachter von Abb. 1 würde auch ohne Erklärung sofort erkennen, daß hier die Oberrheinebene mit ihren Randhöhen abgebildet ist. Als dominierende Strukturen erscheinen die hellen (= warmen) Hangbereiche der Mittelgebirge auf beiden Seiten und nördlich der Oberrheinebene (Vogesen, Schwarzwald, Pfälzer Wald, Odenwald, Hunsrück und Taunus). Hier sind mit Werten bis zu 15°C ¹⁾ die höchsten Oberflächentemperaturen des Gesamttraumes vertreten. Sie kontrastieren sowohl mit der im Mittel kühleren Oberrheinebene ²⁾ als auch mit den nach außen

- 1) Es werden im folgenden meist die HCMM-Daten als Temperaturen in Grad Celsius angegeben. Dies geschieht wegen der größeren Anschaulichkeit und der besseren Vergleichbarkeit verschiedener Werte, obwohl die Eichung der Daten noch nicht gesichert ist. Die Umrechnung in Grad Celsius erfolgte nach dem von der NASA angegebenen Algorithmus (BOHSE u.a. 1979) ohne Berücksichtigung des Zustandes der Atmosphäre im Untersuchungsgebiet. Ein Vergleich zwischen dem so erhaltenen Temperaturwert für einen Kiefernforst bei Hartheim südwestlich von Freiburg und der Oberflächentemperatur, die aus den dort gemessenen langwelligen Strahlungsströmen abgeleitet wurde, zeigt eine gute Übereinstimmung (GOSSMANN (3)). Die bei GOSSMANN und HABERÄCKER (1980) angegebenen Temperaturwerte sind jeweils um 6° zu niedrig (vgl. dort S.27). Eine bei der internen Kalibrierung des HCMM aufgetretene Abweichung von den Ausgangswerten war sowohl bei der NASA als auch bei der Umsetzung der Daten im Rechenzentrum der Universität Freiburg (also zweimal) korrigiert worden.
- 2) Man hat den Eindruck, daß der Übergang von der warmen Hangzone in die kühlere Oberrheinebene auf der Ostseite markanter abgebildet, d.h. mehr auf eine Linie konzentriert ist als auf der Westseite. Dies kann im Norden durch die Asymmetrie, d.h. den Unterschied zwischen der Weinstraßen- und der Bergstraßenseite der Oberrheinebene erklärt werden (Randniederung im Osten, Hügelland und Terrassensystem vor dem Hangfuß im Westen). Da im Südteil der Oberrheinebene, wo eine solche Asymmetrie nicht gegeben ist, dieser Gegensatz aber auch auftritt, muß zu seiner Erklärung auch die geometrische Situation der Aufnahme herangezogen werden. Die Flugbahn des Satelliten verlief in 600 km Höhe etwa 250 km westlich des Rheins von Norden nach Süden. Bei diesem Aufnahmewinkel konnte die Situation am Hangfuß auf der Ostseite besser erfaßt werden.



Abb. 5a: Waldverteilung im Bereich der Oberrheinebene und der sie umgebenden Mittelgebirge (deutscher Teil). Ausschnitt wie in Abb. 1.

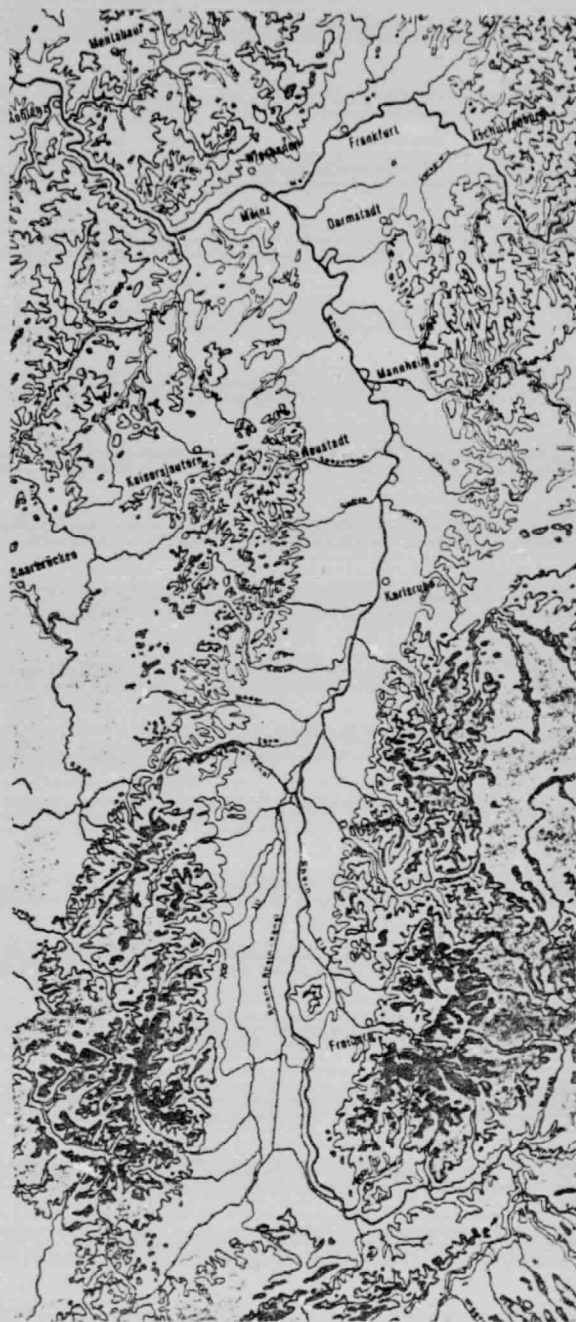


Abb. 5b: Relief und Gewässernetz im Bereich der Oberrheinebene und der sie umgebenden Mittelgebirge. Ausschnitt wie in Abb. 1.

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

anschließenden Hochflächenbereichen. Unter diesen sind am kältesten (= dunkelsten) die waldfreien Hochflächen nördlich des Soonwaldes (A 3, 6 - 9°C), westlich der Hochvogesen (A 9, A 10, A 11; 5 - 8°C) und vor allem östlich des Schwarzwaldes (F 8, F 9, F 10, E 11, F 11, E 12, F 12; 4 - 8°C). Ebenso sind die großen Talsysteme in den Mittelgebirgen durch ihre tiefen Oberflächentemperaturen zwischen 6 und 10°C gut zu erkennen, wie z.B. im Schwarzwald die Täler der Murg (E 9, E 8) und der Kinzig (E 10, D 9), in den Vogesen das Markkircher Tal bei Schlettstadt (B 10) und der oberste Talbereich der Meurthe (A 10), sowie alle Täler, die aus dem Pfälzer Wald heraus in die Oberrheinebene einmünden (B 7, C 7, C 6, C 5).

In der Oberrheinebene selbst erscheint der Rhein in einzelnen Abschnitten als markante weiße Linie, an anderen Stellen als heller Streifen mit diffusen Rändern, an wieder anderen fehlt er ganz. Ein weiteres auffälliges Phänomen sind - wenn auch ohne scharfe Konturen - die Wärmeinseln der großen Städte (Frankfurt/Main, Mannheim/Ludwigshafen, Karlsruhe, Straßburg, Basel etc.). Sie haben ähnlich hohe Oberflächentemperaturen wie die bewaldete Hangzone der Mittelgebirge (11 - 14°C).

Ferner sind bereits in dieser Übersicht viele weitere topographische Strukturen zu erkennen, wie z.B. der Kaiserstuhl (D 11, warm) westlich von Freiburg, die Westpfälzische Moorniederung (A 6 und B 5, kalt) zwischen Homburg und Kaiserslautern oder das Rodungsgebiet des Freudenstädter Grabens (F 9, kalt) auf der Ostseite des Schwarzwaldes.

Vergleicht man Abb. 1 mit Karten der Waldverteilung, der Siedlungsverteilung, des Reliefs und der Gewässer im Maßstab 1 : 2 000 000 (vgl. Abb. 5a und 5b), so zeigen sich in Teilbereichen Kongruenzen, allerdings mit von Ort zu Ort wechselnder Deutlichkeit und in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen. Um diese Zusammenhänge besser zu verstehen und um - soweit die Information der HCMM-Szene dies erlaubt - die Erfassung der einzelnen Faktoren und damit den Einfluß geographischer Strukturen auf die Oberflächentemperatur untersuchen zu können, wurden einzelne Teilstücke von Abb. 1a mit den entsprechenden Ausschnitten der Topographischen Übersichtskarte 1 : 200 000 überlagert.

3 Untersuchung der Abhängigkeit der HCMM-Daten von der topographischen Struktur an kleinräumigen Beispielen

Das im folgenden ausgewertete Material wurde durch Projektion der als Diapositive vorliegenden entzerrten Thermalaufnahmenausschnitte auf die verschiedenen Auszüge des jeweiligen Blattes der Topographischen Übersichtskarte 1 : 200 000 (TÜK 200) ¹⁾ gewonnen. Die Bilder sind gegenüber dem Maßstab der TÜK 200 zum Teil vergrößert oder verkleinert, je nach dem Umfang des benötigten Bildausschnittes. Der jeweils eingezeichnete schwarze Balken entspricht 5 km. Aus Kostengründen wurde eine Schwarz-Weiß-Darstellung gewählt. Eine Farbkodierung der Temperaturen ließe manche Aussage noch deutlicher werden.

In 11 Abschnitten werden die Aussagen der Einzelszenen behandelt. Die Ergebnisse sollen anschließend in Kapitel 4 - thematisch geordnet - zusammengefaßt und diskutiert werden. Bei der Betrachtung der folgenden Bilder können keineswegs alle interessanten Stellen angesprochen werden. Der geländeklimatologisch geschulte Leser wird weitere beachtenswerte Fakten und eine große Zahl weiterer Beispiele für die vorgestellten Phänomene entdecken.

Die Lage der Einzelbilder in der Gesamtszene ist in Abb. 1b durch Rechtecke markiert.

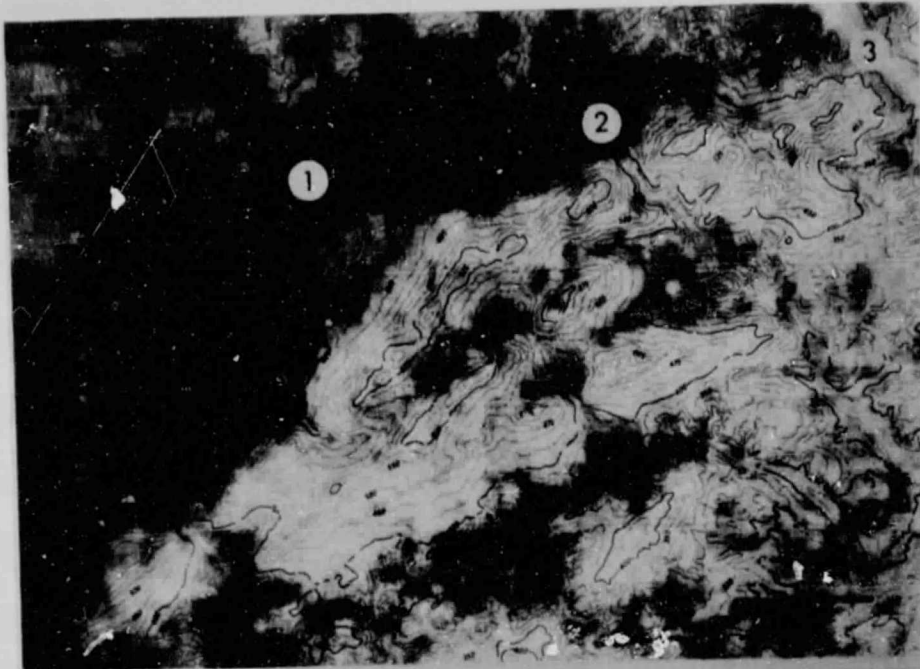
1) Die Genehmigung für die Verwendung der Auszüge der TÜK 200 wurde vom Institut für Angewandte Geodäsie, 6 Frankfurt unter Nr. 80/5 am 28.2.1980 erteilt.

3.1 Soonwald (Abb. 6)

Ähnlich wie der nach Südwesten anschließende Idarwald und der jenseits des Rheins nach Nordosten verlaufende Taunushauptkamm ist der Soonwald ein Beispiel dafür, daß bewaldete Höhenrücken in der Nacht hohe Oberflächentemperaturen ausbilden. Zwischen den Bergzügen aus Taunusquarzit und den waldfreien Ausraumzonen im Süden und Norden bestehen Temperaturdifferenzen bis zu 7°C.

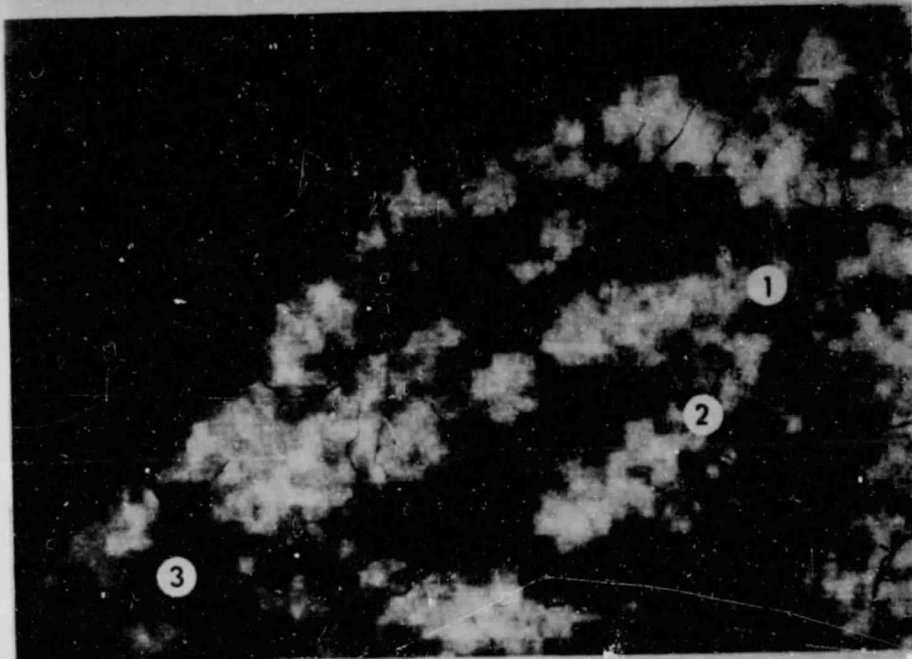
Die Überlagerung des Einflusses der Waldverteilung und des Reliefs auf das Muster der Oberflächentemperatur wird in diesem Ausschnitt an folgenden Erscheinungen deutlich:

- 1) Sowohl im stark reliefierten Soonwald im zentralen Teil des Bildes als auch in dem an Reliefenergie ärmeren Nordwestteil sind die Wälder wärmer als ihre Umgebung. Dabei liegt das Temperaturniveau auf den Bergzügen des Soonwaldes deutlich höher.
- 2) Sowohl im völlig bewaldeten Gräfenbachtal in der Bildmitte als auch in den waldfreien Bereichen im Südosten werden die Hohlformen durch Bereiche kalter Oberflächen nachgezeichnet.
- 3) Überall, wo Talweitungen bzw. Ausraumzonen mit Engtalstrecken abwechseln weisen die ersteren wesentlich tiefere Oberflächentemperaturen auf. Dies könnte man als Folge des Wechsels von Kaltluftstau in den Talweitungen und Kaltluftabfluß in den Engtalstrecken interpretieren. Etwas Vorsicht ist bei diesem Schluß allerdings geboten, da dieses Phänomen in den Talengen im Grenzbereich der geometrischen Auflösung des Thermalbildes liegt und deshalb möglicherweise ein kalter Talboden hier nicht erfaßt wird.



a) Relief

- 1 Simmern
- 2 Rheinböllen
- 3 Rheintal



b) Gewässernetz

- 1 Guldenbach
- 2 Gräfenbach
- 3 Simmernbach

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY



c) Wald und Relief

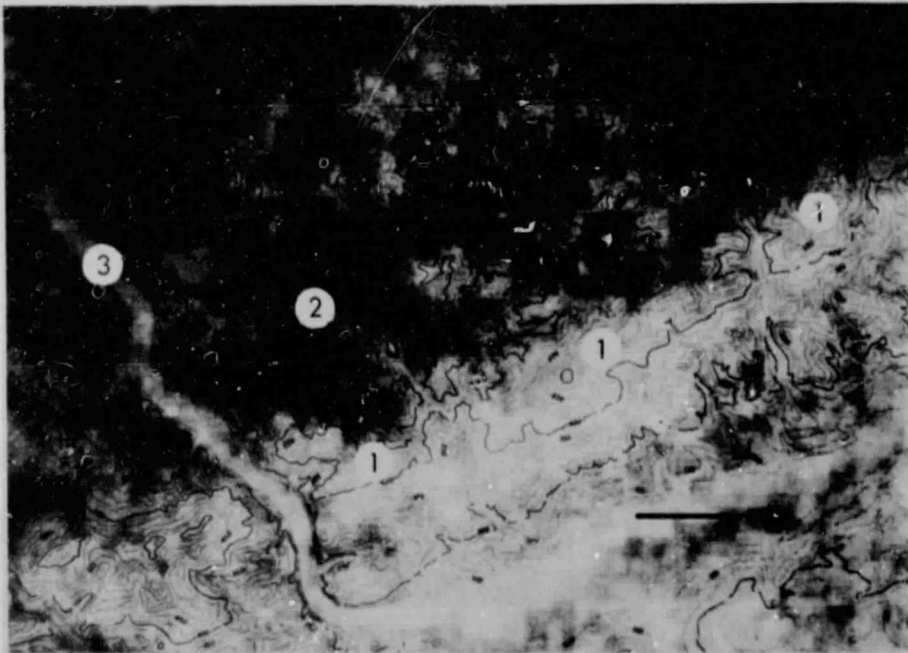
Abb. 6: Soonwald
Grau: HCMM-Daten
(hell = warm,
dunkel = kalt)
Schwarz: Auszüge
aus der TÜK 200

3.2 Taunushauptkamm und Wispertal (Abb. 7)

Das auf der Nordseite des Taunushauptkammes liegende und bei Lorch in das Mittelrheintal einmündende Wispertal und sein "Wisperwind" sind ein in der klimatologischen Literatur (vgl. BLÜTHGEN 1966, S.286) bekanntes Beispiel für ein nächtliches lokales Windsystem. Abb. 7a zeigt, inwieweit die HCMM-Aufnahme seinen Einzugsbereich durch die Verbreitung niedriger Oberflächentemperaturen im Haupttal und in den Seitentälchen erfaßt. Beim flüchtigen Betrachten hat man den Eindruck, daß das Verbreitungsmuster tiefer Oberflächentemperaturen im Bereich des Wispertales ausschließlich vom Höhenlinienbild, d.h. vom Relief bestimmt wird. Der genauere Vergleich mit der Karte der Waldverteilung in Abb. 7b ergibt jedoch, daß dies nur für das Haupttal und die tiefer eingeschnittenen Nebentäler gilt. Sie werden unabhängig von ihrer Waldbedeckung als kalt abgebildet. In den Quellbereichen der Täler und auf den Hochflächen dagegen korrespondieren die tiefen Oberflächentemperaturen mit den großen Rodungsinseln.

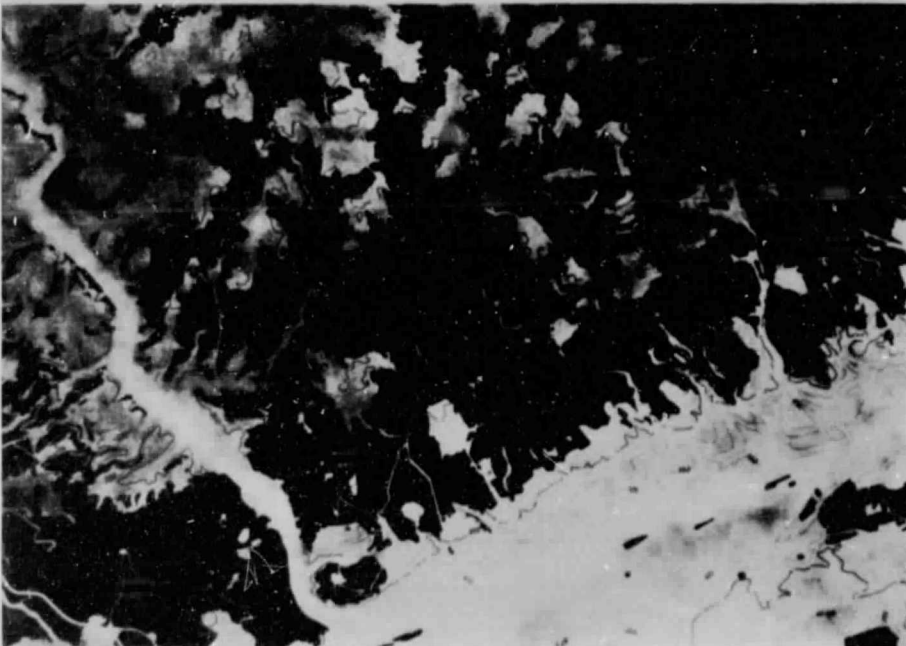
Die wärmsten Bereiche des Bildes sind der bewaldete Südhang und der Höhenrücken des Taunushauptkammes sowie das Rheintal. Hier im Rheintal wird offensichtlich die Tendenz konkaver Geländeformen zu tiefen Oberflächentemperaturen durch die Bündelung der Wasserfläche, zweier Fernstraßen, zweier Eisenbahnlinien und des Siedlungsbandes auf beiden Seiten des Flusses überspielt.

Am Ausgang des Wispertales in das Mittelrheintal ergibt sich keine Antwort auf die Frage, ob der Wisperwind eine Erniedrigung der Oberflächentemperaturen im Rheintal hervorruft.



a) Relief

- 1 Taunushauptkamm
- 2 Wispertal
- 3 Mittelrheintal



b) Wald und Relief

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

Abb. 7: Taunushauptkamm und Wispertal

Grau: HCMM-Daten (hell = warm, dunkel = kalt)
Schwarz: Auszüge aus der TÜK 200, Blatt CC 6310

3.3 Das Speyerbachtal bei Neustadt a.d. Weinstraße (Abb. 8)

Das Talsystem des Speyerbaches im Pfälzer Wald ist wegen seiner nahezu vollständigen Bedeckung mit Wald ein wichtiges Beispiel für den Einfluß des Reliefs auf das Muster der Oberflächentemperaturen. Es zeigt noch deutlicher als das Wispertal, daß in den bewaldeten Mittelgebirgen die Täler keineswegs nur wegen der Wiesen auf den Talsohlen im nächtlichen Thermalbild kalt erscheinen.

Die Verbreitung kalter Oberflächen ($< 9^{\circ}\text{C}$) unabhängig von der Richtung und Breite des Talabschnittes einheitlich bis zu einer Höhe von etwa 400 m - in den oberen Talabschnitten reichen sie etwas höher hinauf als am Talausgang - belegen, daß der den Pfälzer Wald zum Aufnahmezeitpunkt überwehende Ostwind in das Talsystem nicht eingreifen konnte. Dieses war von der durch die Ausstrahlung der Oberflächen gebildeten Kaltluft erfüllt. Die Existenz dieses Kaltluftreservoirs ist in diesem Falle auch durch die Windmessungen am Talausgang gesichert. Die Station Neustadt des Deutschen Wetterdienstes registrierte als Stundenmittelwert von 3 - 4 Uhr MEZ am 30.5.78 eine Strömung aus WSW (260°) mit einer Geschwindigkeit von 1,2 m/sec. Unter der Ostströmung und neben der flachen, in der Oberrheinebene vorhandenen Nordströmung war am Ausgang des Speyerbachtals mit der von W nach O gerichteten Bewegung der ausfließenden Kaltluft eine dritte Windrichtung ausgebildet.

Dieses Gesamtbild entspricht in hohem Maße den Feststellungen, die VOGT, SEITZ und FEZER (1977) aus einer Flugzeugthermalaufnahme desselben Raumes abgeleitet haben. Bei genauer Betrachtung von Abb. 8a hat man sogar den Eindruck, daß auch die von FEZER beschriebene Schrägstellung der Kaltluftoberfläche durch die Einwirkung des Höhenwindes in der Aufnahme ihren Niederschlag findet. Es sieht so aus, als würden die kalten Oberflächen in den meisten Talabschnitten auf der Westseite höher hinaufreichen. Dies sollte man allerdings mit Vorbehalt aufnehmen, da schon ein kleiner Fehler in der geometrischen Korrektur der HCMM-Aufnahme denselben Effekt hervorrufen könnte.

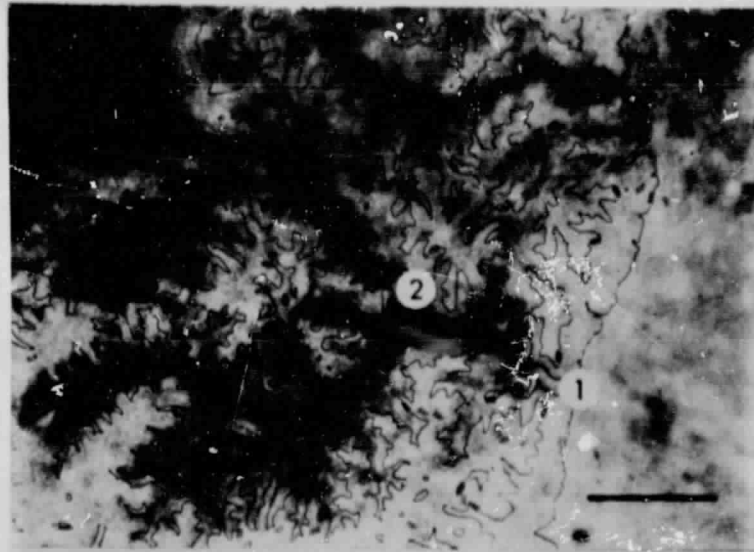
Naheliegender scheint jedoch, daß die Bedingungen für die Erfassung des dargestellten Phänomens insofern bei dieser Aufnahme

besonders günstig waren, als der Ostwind das Abfließen der Kaltluft aus dem Tal heraus hemmte und dadurch eine größere Kaltluftansammlung und dadurch eine stärkere Auskühlung des Tales hervorrief, als dies bei anderen Windrichtungen der Fall gewesen wäre.

Während die Existenz des lokalen Windes am Ausgang des Speyerbachtals gesichert und die Erfassung seines Einzugsbereiches durch die Thermalaufnahme evident ist, gibt das Bild keine sicheren Hinweise auf seine Auswirkungen am Talausgang. Dort sind zwei andere Erscheinungen beachtenswert:

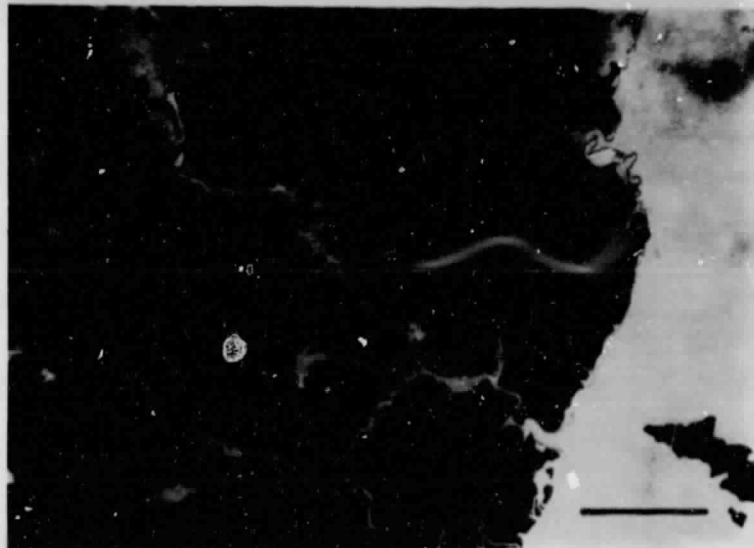
1) Die pediment- oder glacisähnliche Fußfläche des Pfälzer Waldes ist beinahe ebenso warm ($11 - 13^{\circ}\text{C}$) wie der bewaldete Anstieg, obwohl sie waldfrei (Weinbau) ist und nur ein geringes Gefälle nach Osten hat.

2) Die Waldfläche auf dem Schwemmfächer des Speyerbaches am rechten Bildrand erscheint etwas heller (wärmer) als ihre Umgebung.



a) Relief

- 1 Neustadt
- 2 Speyerbachtal



b) Wald

Abb. 8: Speyerbachtal bei Neustadt a.d. Weinstraße

Grau: HCMM-Daten (hell = warm, dunkel = kalt)

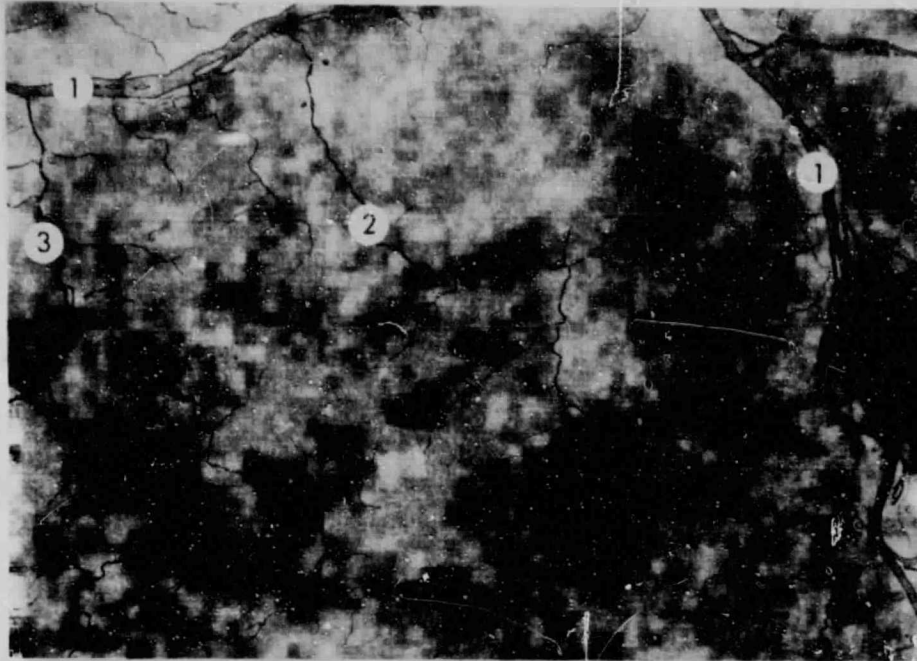
Schwarz: Auszüge aus der TUK 200, Blatt CC 7110

3.4 Das Rheinhessische Hügelland (Abb. 9)

Nach der Darstellung der thermischen Differenzierung in einem bewaldeten, von Tälern tief zerschnittenen Bergland ist es ebenso von Interesse zu sehen, inwieweit das Muster der Oberflächentemperaturen in einer waldfreien Landschaft mit viel kleinerer Reliefenergie wie dem Rheinhessischen Hügelland von den Oberflächenformen bestimmt wird.

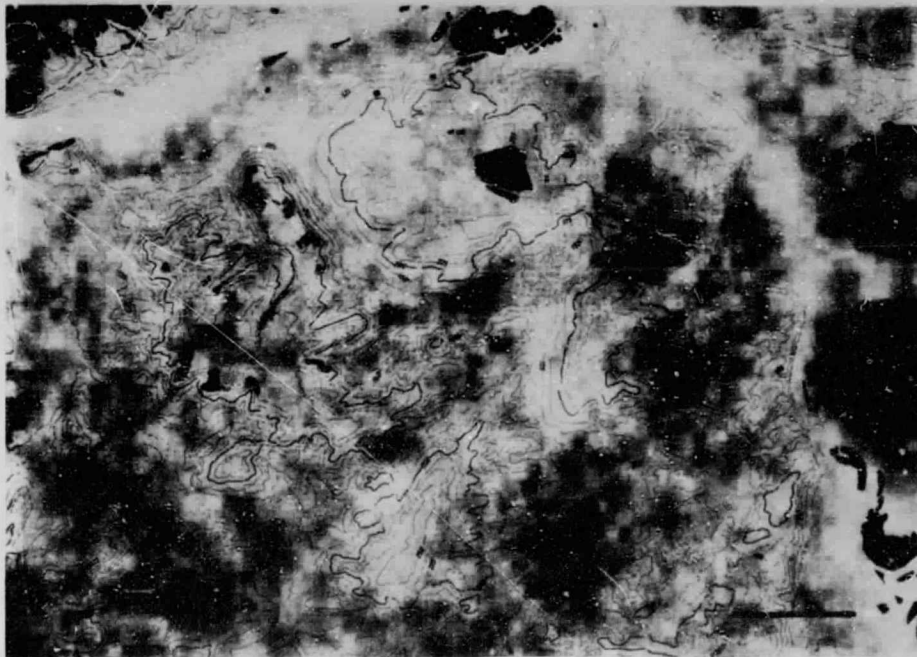
Während im vorausgehenden Beispiel ein eindeutiger Gegensatz zwischen den warmen Hochflächenresten und den kalten Tälern bestand, ist das Bild hier weniger übersichtlich. Zwar sind im Mittel auch hier die Erhebungen über 200m etwas wärmer als die dazwischenliegenden Talungen. Doch besitzen z.B. diese keinen durchgehend kalten Talboden, sondern sind in Bereiche tiefer Oberflächentemperaturen - meist sind dies die großen Wannen - und in wärmere Verbindungsstücke gegliedert. Ferner sind große Mulden auf den Höhenrücken zum Teil ebenso kalt wie diese Talweitungen. So ist auf der Westseite des Höhenzuges in der linken Bildhälfte die klassische Differenzierung in eine warme Hangzone zwischen einer kühlen Hochfläche und einer ebenso kühlen Niederung ausgebildet.

Über die Beziehung zwischen Relief und Oberflächentemperatur hinaus wäre es in diesem Beispiel interessant, die Verteilung des Wein- und des Obstbaues mit dem thermalen Muster zu vergleichen. Bereits eine flüchtige Gegenüberstellung zeigt nämlich, daß die Verbreitung der Weinbauareale in hohem Maße mit den hellen (warmen) Bereichen korrespondiert. Dies bedeutet, daß die der Differenzierung der Landnutzung in diesem Raum zugrundeliegenden thermischen Bedingungen im Prinzip auch in dieser Thermalaufnahme erfaßt werden.



a) Gewässernetz

- 1 Rhein
- 2 Selz
- 3 Nahe



b) Relief und Wald

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

Abb. 9: Rheinhessisches Hügelland

Grau: HCMH-Daten (hell = warm, dunkel = kalt)
Schwarz: Auszüge aus der TÜK 200, CC 6310

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

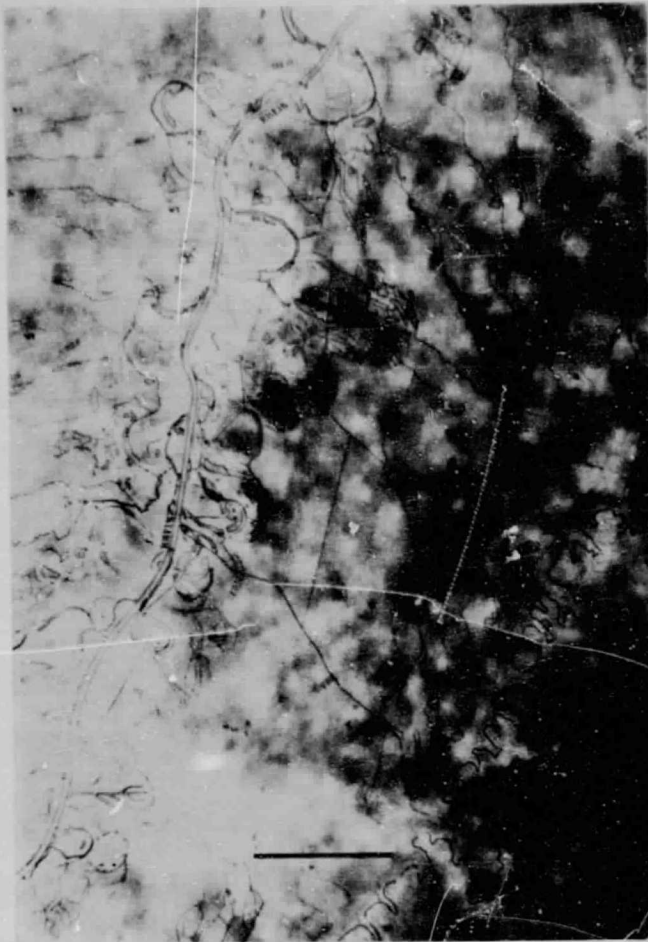
3.5 Die Oberrheinebene und der Rand des Kraichgaues bei Karlsruhe (Abb. 10)

Es war zu erwarten, daß auf der nahezu horizontalen Fläche der Oberrheinebene andere Faktoren das Muster der Oberflächentemperaturen bestimmen als in den bisher vorgestellten Hügel- und Bergländern. Von Interesse ist in dem gewählten Ausschnitt vor allem der Bezug der Oberflächentemperaturen zum Gewässernetz, zur Siedlungs- und zur Waldverteilung.

1) Gewässer: Auffällige Strukturen des Gewässernetzes gibt es sowohl in den besonders hellen (warmen) als auch in den besonders dunklen (kalten) Bereichen. Warm ist die Rheinaue mit den Altrheinschlingen vor allem dort, wo entweder größere Wasserflächen oder Reste des Auwaldes erhalten sind. Kalt sind einige ältere Altrheinschlingen und die Teile der Randniederung nordöstlich von Karlsruhe, in denen viele Entwässerungsgräben anzeigen, daß das Land hier noch etwas tiefer liegt als die Umgebung und wegen des hohen Grundwasserstandes in der Regel als Grünland genutzt wird.

2) Siedlungen: Sehr deutlich tritt hier die Wärmeinsel der Stadt Karlsruhe hervor (im zentralen Teil der Stadt bis zu 14°C gegenüber 10°C im Umland). Ähnlich wie in Mannheim/Ludwigshafen (siehe unten) und Straßburg enden auch hier die warmen Flächen im Norden der Stadt mit der Grenze der dichten Bebauung während sie im Süden weiter in den suburbanen Raum hineinreichen. Außer der Stadt Karlsruhe sind auch viele kleinere Siedlungen durch ein Signal (heller Fleck) im Thermalbild vertreten. Dies gilt vor allem für die Dörfer, die nördlich von Karlsruhe am Hochgestade, d.h. am Rande der Niederterrasse zur Aue liegen (Eggenstein, Leopoldshafen, Linkenheim, Liedoldsheim usw). Die durch diese Dörfer (der sogenannten Rheinzeile) besetzten vorspringenden Ecken der Niederterrasse weisen alle höhere Oberflächentemperaturen als ihr Umland auf, während die Dörfer der sogenannten Bergzeile am Rande des Kraichgaues und noch mehr die Dörfer in den Tälern des Kraichgaues den tiefen Oberflächentemperaturen ihrer Umgebung angepaßt erscheinen.

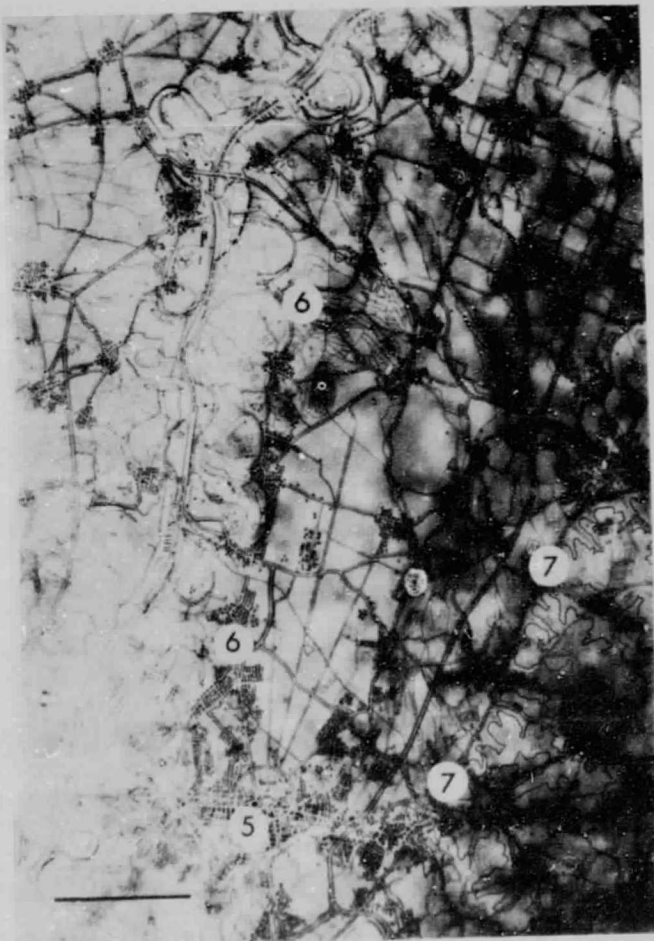
3) Wald: Sehr unterschiedlich ist das Verhalten der Waldflächen. Die Auewaldreste am Rhein (siehe oben) und die Waldstücke am Rande des Kraichgaues haben deutlich höhere Oberflächentemperaturen als benachbarte Wiesen- und Ackerflächen. Für den Hardtwald unmittelbar nördlich von Karlsruhe gilt dies nur, wenn man ihn mit der Wiesenniederung auf seiner Ostseite vergleicht. Bei den Hardtwäldern oben rechts und beim Bellheimer Wald auf dem Schwemmfächer der Queich oben links ist ein Temperaturunterschied zum umliegenden Land nicht zu erkennen.



a) Gewässer und Relief



b) Gewässer, Relief und Wald



c) Gewässer, Relief, Siedlungen

- 1 Kraichgau
- 2 Randniederung
- 3 Hardtwälder
- 4 Bellheimer Wald
- 5 Karlsruhe (276 000 Ew)
- 6 Rheinzeile
- 7 Bergzeile

Abb. 10: Oberrheinebene und Rand des Kraichgaues bei Karlsruhe

Grau: HCMM-Daten (hell = warm, dunkel = kalt)
Schwarz: Auszüge aus der TUK 200, Blatt CC 7110

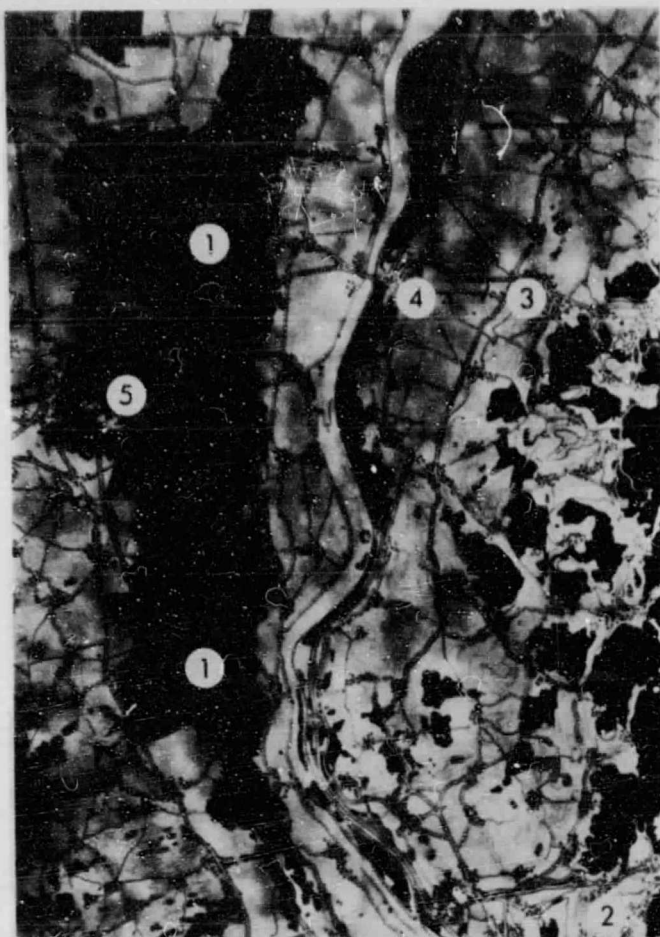
3.6 Die Oberrheinebene nördlich von Basel (Abb. 11)

Der vorgestellte Ausschnitt aus dem pleistozänen Schotterfächer des Rheins und den Ausläufern des Südschwarzwaldes nördlich von Basel (die Stadt Basel liegt unmittelbar außerhalb des unteren Bildrandes) ist deshalb bemerkenswert, weil er die im letzten Abschnitt bereits angesprochenen Unterschiede in den Oberflächentemperaturen der Wälder je nach ihrer topographischen Lage besonders klar wiedergibt.

Der Forêt Domaniale de la Harth auf der linken Rheinseite gehört mit Temperaturen zwischen 6 und 8°C zu den kältesten Bereichen der gesamten Oberrheinebene und ist in Abb. 11b dunkler als die nach Westen und Osten anschließenden landwirtschaftlichen Nutzflächen. Dasselbe gilt für die Kiefernforste, die auf der rechten Seite des Altrheins die Stelle der ehemaligen Auewälder eingenommen haben (7 - 9°C).

Im Gegensatz dazu sind die Waldflächen auf den Ausläufern des Südschwarzwaldes am rechten Bildrand besonders warm (bis zu 14°C). Die Vorbergzone zwischen Lörrach und Müllheim ist außerdem ein weiteres Beispiel für die Kongruenz zwischen den Reliefformen und dem Verbreitungsmuster kalter und warmer Oberflächen. Alle Täler und Mulden sind deutlich kühler als die dazwischenliegenden Hügel und Bergzüge.

Hingewiesen sei auch auf die Erfassung und unterschiedliche Abbildung verschiedener Industrieanlagen. So erscheint das Areal des Chemiekonzerns Rhône-Poulenc auf der linken Rheinseite bei Neuenburg als heller Fleck (etwas oberhalb der Bildmitte, 14°C), während das Peugeot-Werk im Forêt Domaniale de la Harth als besonders kalt abgebildet wird.



a) Wald, Relief und Siedlungen

- 1 Forêt Domaniale de la Harth
- 2 Lörrach
- 3 Müllheim
- 4 Neuenburg
- 5 Peugeot-Werk

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY



b) Relief und Siedlungen

Abb. 11: Oberrheinebene
nördlich von Basel

Grau: HCMM-Daten (hell =
warm, dunkel = kalt)
Schwarz: Auszüge aus der
TÜK 200, Blatt CC 8710

3.7 Mannheim/Ludwigshafen und Straßburg (Abb. 12 und Abb. 13)

Die Wärmeinseln der großen Städte Mannheim/Ludwigshafen und Straßburg sind bereits in der Gesamtübersicht der Oberrheinebene (Abb. 1) gut zu erkennen. Die Vergrößerungen (Abb. 12 und 13) zeigen folgende Einzelheiten:

- 1) In beiden Fällen weist die helle Fläche keine scharfe Grenze nach außen auf, sondern geht in einem diffusen Übergangsbereich in das Umland über.
- 2) In beiden Fällen beginnt dieser Übergangsbereich auf der Nordseite der Stadt am Rand der dichter bebauten Flächen, während er auf der Südseite ein Stück ins Vorland hinaus verschoben ist. Der suburbane Raum ist jeweils auf der Südseite der Stadt wesentlich wärmer als auf der Nordseite.
- 3) In Abb. 12 sind die wärmsten Oberflächen der Stadtkern von Mannheim und die Industrieanlagen der BASF im Norden von Ludwigshafen ($13 - 14^{\circ}\text{C}$). Bei Straßburg ist eine Fläche, die in etwa die Altstadt und einen nach Süden anschließenden Bereich derselben Größe abdeckt, einheitlich warm ($12 - 13^{\circ}\text{C}$). Die Temperaturdifferenz zum Umland beträgt in beiden Fällen ca. 4°C .
- 4) Bei Mannheim/Ludwigshafen besitzen die am linken Bildrand liegenden, noch nicht städtisch überbauten Flächen der Altrheinschlingen tiefere Oberflächentemperaturen als ihre Umgebung.

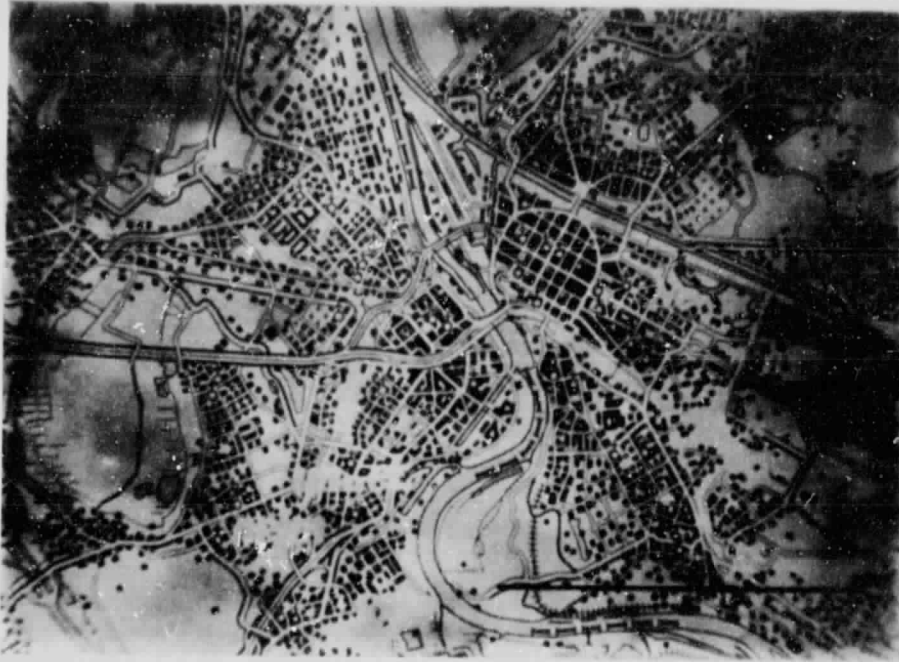


Abb. 12: Mannheim/Ludwigshafen (480 000 Ew)

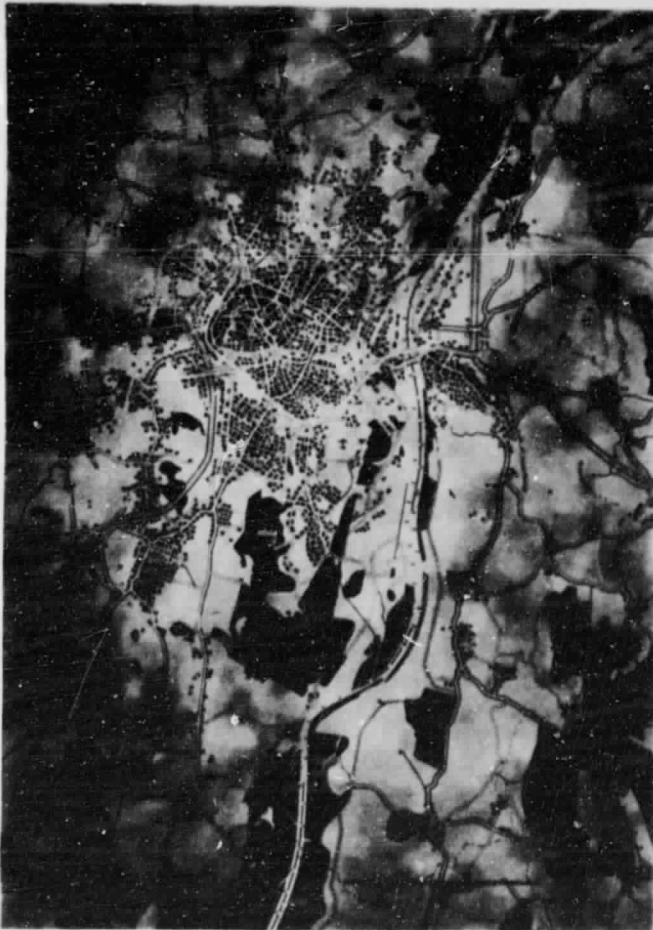


Abb. 13: Straßburg/Kehl
(Aggl. 355 000 Ew)

3.8 Colmar und Freiburg (Abb. 14 und Abb. 15)

Neben den großen Agglomerationen treten auch viele kleinere Städte wie Worms, Speyer, Kaiserslautern, Pirmasens, Rastatt und viele andere durch ihre höheren Oberflächentemperaturen als Wärmeinseln im Thermalbild in Erscheinung. Als Beispiel zeigt Abb. 14 die Wärmeinsel von Colmar. Ähnlich wie bei den großen Städten besteht auch hier ein gleichmäßiger Übergang ohne greifbare Konturen von der besonders warmen Innenstadt zum kühlen Vorland.

Die Tatsache, daß es schwierig ist, Einzelheiten der städtischen Topographie bestimmten Strukturen im HCMM-Bild zuzuordnen, heißt aber nicht, daß das HCMM-Bild die Temperaturverteilung in der Stadt nicht wiedergeben würde. Gelingt es, in der Umgebung der Stadt Paßpunkte zu finden, die eine genaue Zuordnung von Thermalbild und Kartengrundlage erlauben, so beschreibt die HCMM-Aufnahme sehr wohl die Verteilung der Oberflächentemperaturen in der Stadt. Das aus der HCMM-Aufnahme abgeleitete thermische Muster für Freiburg in Abb. 15a und eine aus einer Aufnahme des Deutschen Flugzeugmeßprogrammes für einen vergleichbaren Zeitpunkt erstellte Karte der Oberflächentemperaturen (Abb. 15b) zeigen eine erstaunlich gute Übereinstimmung.

Auf der Übersicht in Abb. 1 tritt Freiburg als Wärmeinsel nicht in Erscheinung, da es im Nordosten und Südwesten von den ebenso warmen bewaldeten Höhen des Schwarzwaldes begrenzt wird.

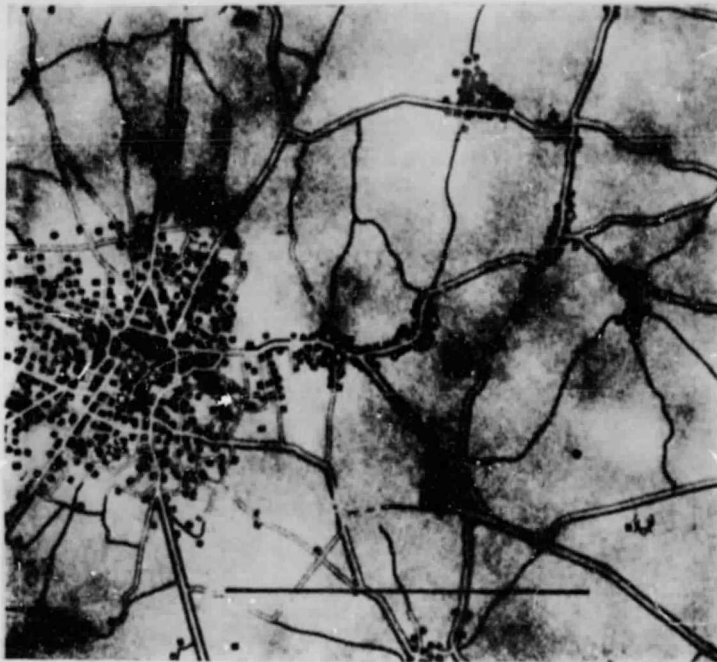


Abb. 14: Die Wärmeinsel der Stadt Colmar

Grau: HCMM-Daten (hell = warm, dunkel = kalt)
Schwarz: Auszug aus der TUK 200, Blatt CC 7910

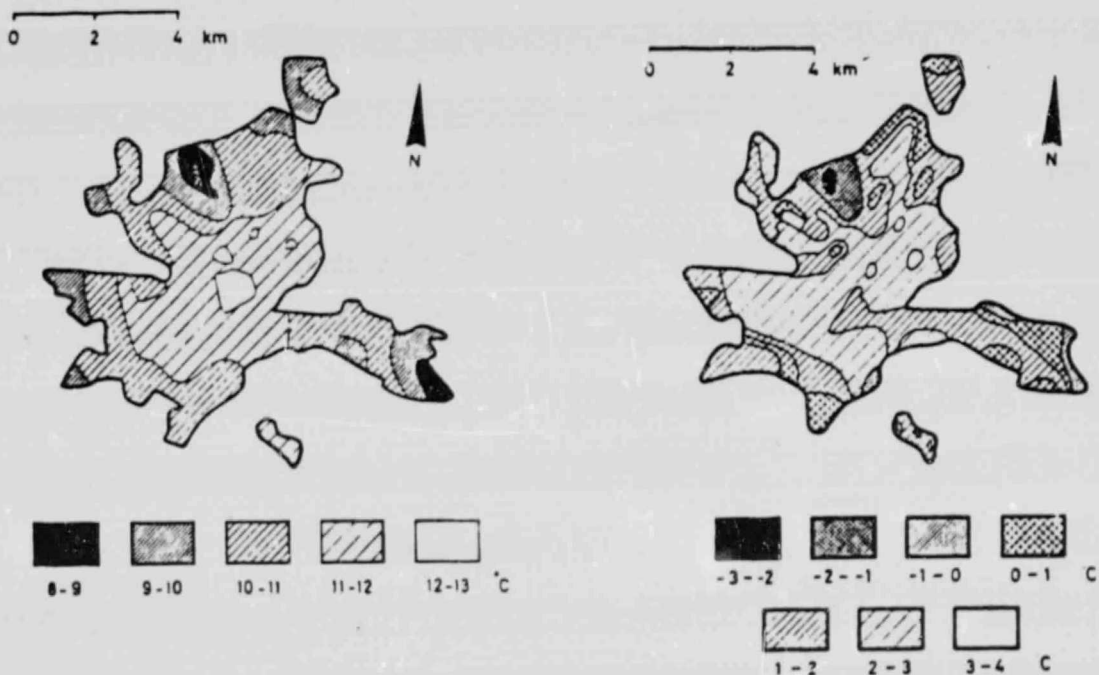


Abb. 15: Muster der Oberflächentemperaturen im Stadtgebiet von Freiburg i.Br.

links: HCMM-Aufnahme vom 30.5.78, 3.13 MEZ nach der geometrischen Entzerrung auf Gauß-Krüger-Koordinaten und Glättung an den Rändern der Bildelemente.

rechts: FMP-Aufnahme vom 1.4.76, 4.40 MEZ, Flughöhe 4000 m, geometrische Auflösung 10 m; nach einer Mittelung über 100 x 100m und manueller Entzerrung auf Gauß-Krüger-Koordinaten.

3.9 Breisgau und Kaiserstuhl (Abb. 16)

Der Vergleich der Abbildungen 16a, b und c bestätigt zunächst einige der schon bei früheren Beispielen gewonnenen Aussagen:

- 1) Von den Wäldern sind die auf den Höhen des Kaiserstuhles etwas links von der Bildmitte und auf den Ausläufern des Schwarzwaldes am rechten Bildrand besonders warm ($11 - 13^{\circ}\text{C}$). Deutlich kühler ($9 - 10^{\circ}\text{C}$), aber immerhin noch etwas wärmer als ihre Umgebung sind die Auwaldreste am Rhein nördlich von Breisach. Noch einmal 1 - 2 Grad kälter und ohne deutlichen Unterschied zu den sie unterbrechenden Ackerflächen sind die Mooswälder auf dem Schotterfächer der Dreisam in der Freiburger Bucht.
- 2) Wie aus den Flugzeugthermalaufnahmen bekannt war, sind von den waldfreien, nicht städtischen Flächen die vom Weinbau genutzten Riedel- und Hügellandschaften am wärmsten. Dazu gehören außer dem Kaiserstuhl und der Emmendinger Vorbergzone (am oberen Bildrand rechts von der Autobahn) auch die kleinen Höhenzüge des Tuniberges (am unteren Bildrand etwa in der Mitte) und des Nimbergs (rechts von der Bildmitte).
- 3) Daneben spielen aber offensichtlich auch noch wesentlich kleinere Höhendifferenzen bis herunter zu 1m und noch weniger im thermalen Muster eine Rolle. So sind in Abb. 16c in der Freiburger Bucht unabhängig von der Waldverteilung die Flächen besonders dunkel, in denen die Häufung von Entwässerungsadern eine im Höhenlinienbild (Abb. 16d) nicht mehr in Erscheinung tretende Tiefenlinie anzeigen.
- 4) Erwähnung verdienen auch die kühlen Wiesenhochflächen im zentralen Kaiserstuhl und die Zuordnung der Bereiche niedriger Oberflächentemperaturen zum Gewässernetz am Rand des Schwarzwaldes insbesondere im Rodungsgebiet von Ottoschwanen (in der rechten oberen Bildecke).

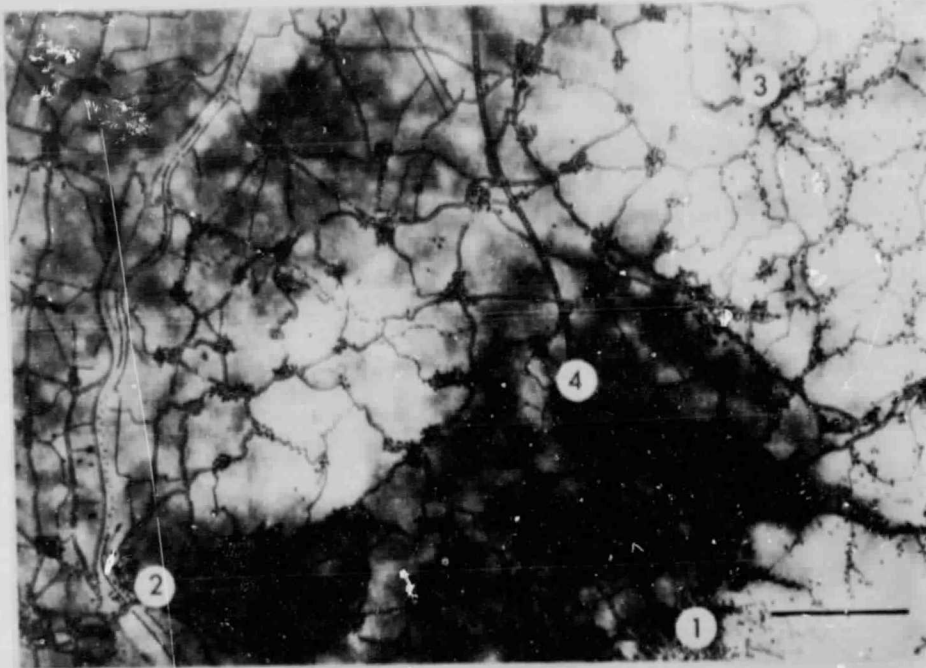
Da für Teile des Breisgaves aus den Befliegungen des Deutschen Flugzeugmeßprogrammes im Jahre 1976 Infrarotthermalaufnahmen vorliegen, ist es möglich, für diesen Bereich Flugzeug- und

Satellitenthermalaufnahmen miteinander zu vergleichen. Abb. 16e zeigt den in Abb. 16d markierten Geländestreifen in einer Flugzeugaufnahme aus 4000m Höhe mit einer geometrischen Auflösung von 10m im Nadir des Flugzeuges. Man erkennt:

1) Die Flugzeugaufnahme zeigt eine völlig andere Struktur. Sie enthält eine Vielzahl von Details und beschreibt aus sich heraus die Topographie mit Waldgrenzen, Wegen, Gewässern, Siedlungen usw.. Die Satellitenthermalaufnahme mittelt über alle diese Einzelheiten. Sie stellt die Topographie nicht dar, sondern sie kann der topographischen Struktur zugeordnet und aus dieser erklärt werden. Dafür gibt sie die großräumige Verteilung der Oberflächentemperaturen viel anschaulicher wieder als die Flugzeugaufnahme.

2) Der schon mehrfach angesprochene Gegensatz im Verhalten der Wälder in den Bergländern einerseits und in der Oberrheinebene andererseits wird durch die Flugzeugaufnahme bestätigt. Die Wälder des zentralen Kaiserstuhles sind wesentlich wärmer als die des östlich davon liegenden Dreisam-Schotterfächers, wenn auch diese in der Flugzeugaufnahme noch deutlich durch höhere Temperaturen von ihrer Umgebung abgesetzt sind.

3) Die im nächsten Kapitel behandelte Erfassung verschiedener Dörfer in der Satellitenthermalaufnahme läßt sich aus der Flugzeugaufnahme erklären. Die an der Nordwestecke auf der Forchheimer Niederterrasse liegenden Dörfer Wyhl und Forchheim kontrastieren dort sehr stark mit ihrer Umgebung, während ähnlich große Dörfer im Bereich des Kaiserstuhls kaum zu erkennen sind.



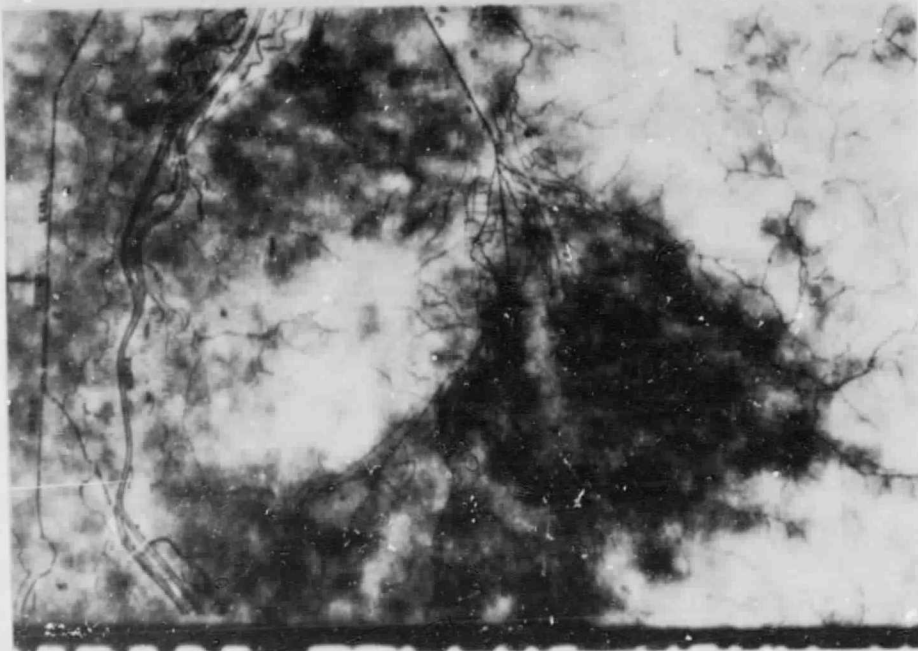
a) Siedlungen und Verkehrswege

- 1 Freiburg
- 2 Breisach
- 3 Ottoschwanden
- 4 Autobahn



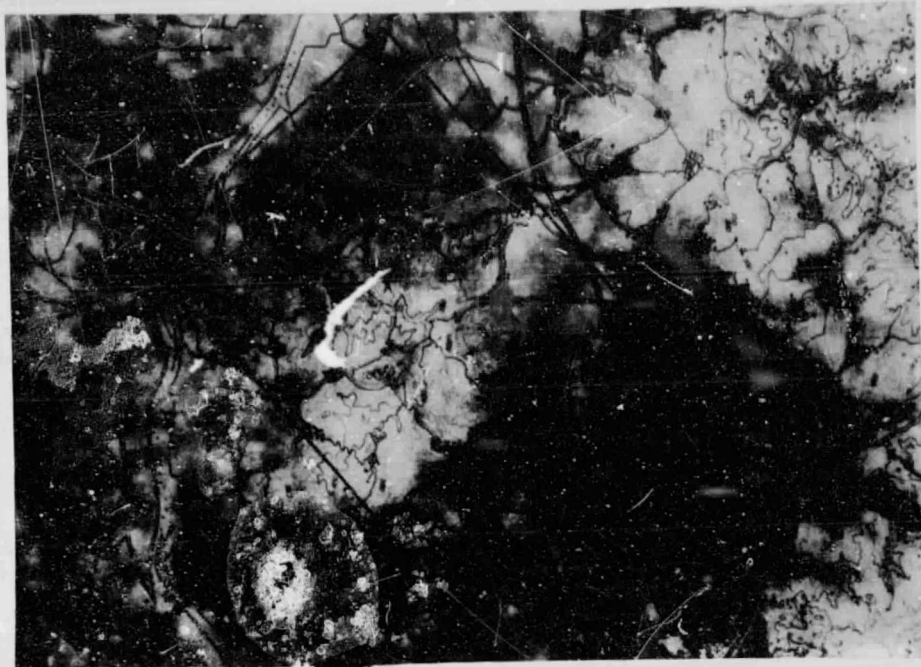
b) Relief, Wald, Siedlungen

- 1 Kaiserstuhl
- 2 Emmendinger Vorbergzone
- 3 Freiburger Bucht
- 4 Tuniberg
- 5 Nimberg
- 6 Forchheimer Niederterrasse

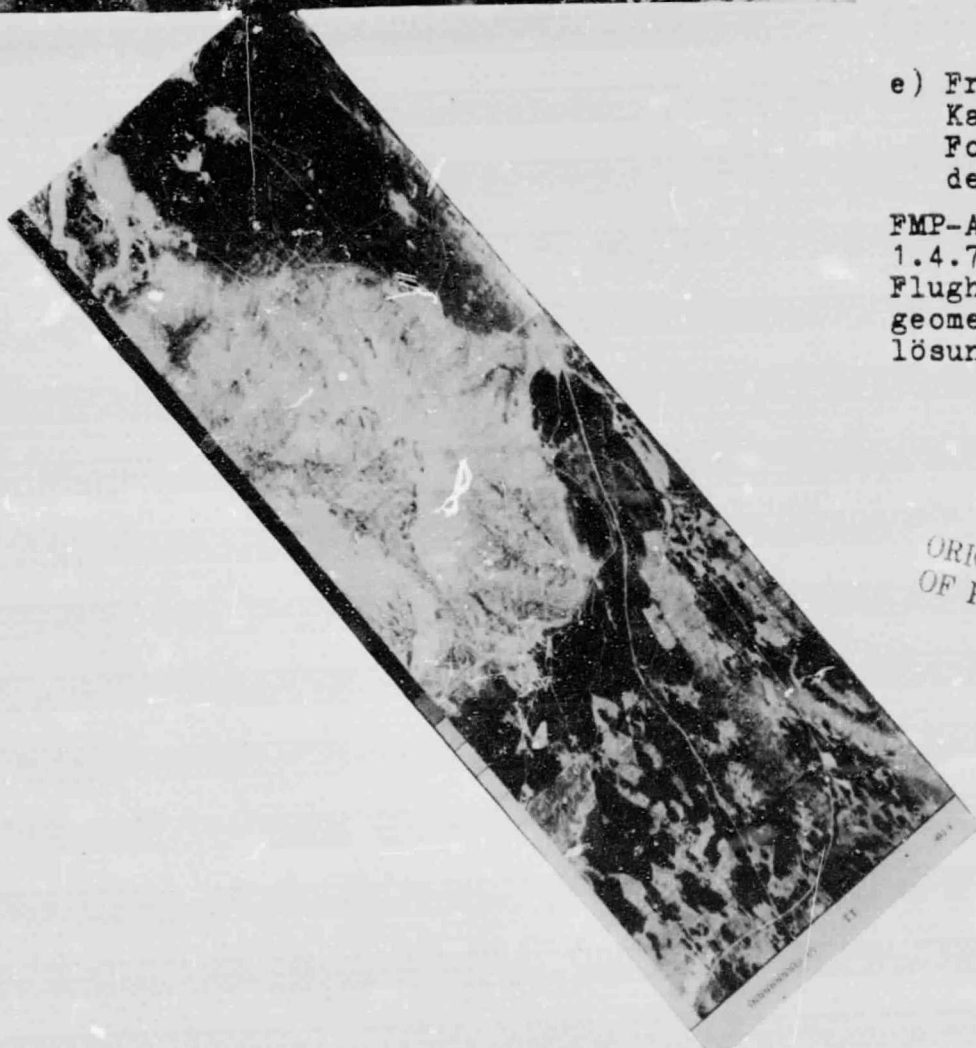


c) Gewässer

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY



d) Relief und
Siedlungen



e) Freiburger Bucht,
Kaiserstuhl und
Forchheimer Nie-
derterrasse

FMP-Aufnahme vom
1.4.76, 4.40 MEZ,
Flughöhe 4000m,
geometrische Auf-
lösung 10m.

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

Abb. 16: Breisgau und Kaiserstuhl

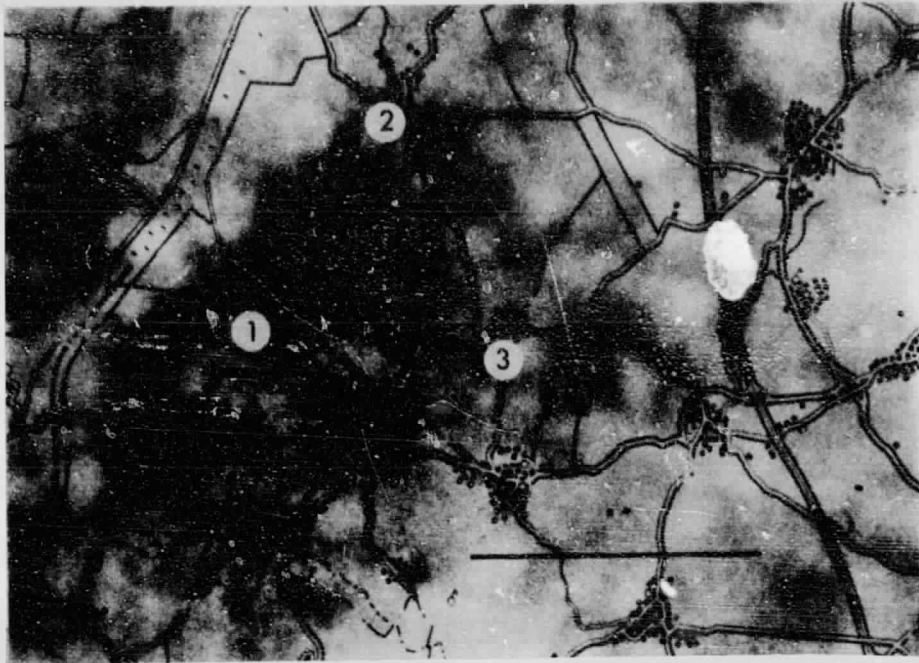
Grau: HCMM-Daten (hell = warm, dunkel = kalt)
Schwarz: Auszüge der TUK 200, Blatt CC 7910

3.10 Kleinstädte und Dörfer in verschiedener topographischer Lage (Abb. 17 und Abb. 18)

Schon im Abschnitt 3.5 war festgestellt worden, daß auch kleine Siedlungen in topographisch günstiger Lage in den HCMM-Daten ein Signal hervorrufen können. Dieses Phänomen wird im folgenden anhand von Dörfern in der Oberrheinebene und im Oberen Gäu auf der Ostseite des Schwarzwaldes wieder aufgegriffen.

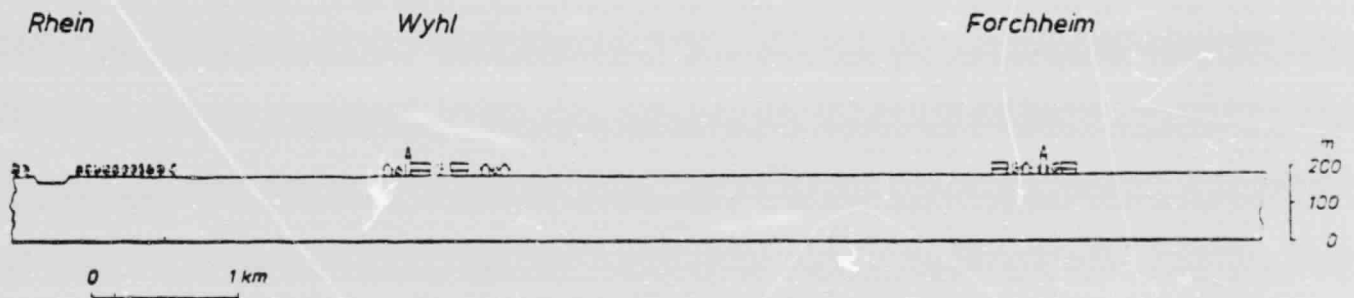
Die Dörfer Wyhl (ca. 2700 Ew), Weisweil (ca. 1400 Ew) und Forchheim auf dem Dreieck der Forchheimer Niederterrasse nördlich des Kaiserstuhls (vgl. Abb. 16b und Abb. 17), die im Thermalbild jeweils eindeutig einem helleren Fleck zuzuordnen sind, liegen auf einer nahezu ebenen Fläche, deren Höhendifferenzen auch in einem Geländeprofil in 2 1/2-facher Überhöhung (vgl. Abb. 17b) nicht mehr dargestellt werden können. Die von ihrer Struktur her diesen sehr ähnlichen Dörfern (alte Haufendörfer mit dicht verbautem Ortskern) Dunningen (ca. 4600 Ew), Waldmössingen usw. in der flachen Mulde des Eschachtales im Oberen Gäu östlich des Schwarzwaldes dagegen (vgl. Abb. 18b) treten im Thermalbild überhaupt nicht in Erscheinung. Ähnlich wie viele andere Haufendörfer der Gäulandschaften in Nestlage liegen sie jeweils in einem reliefbedingten Areal tiefer Oberflächentemperatur und gehen darin auf. Während also in den Altsiedellandschaften auf den Schotterflächen des Rheins bei Strahlungswetterlagen die höchsten nächtlichen Oberflächentemperaturen in den Dörfern und ihrer unmittelbaren Umgebung auftreten, ist dies im sehr ähnlich strukturierten Altsiedelland der Gäuflächen gerade umgekehrt. Dort werden in der Nacht die in Hohlformen liegenden Siedlungen und ihre unmittelbare Umgebung am kältesten, während die zwischen den Siedlungen liegenden Rücken und Flächenreste wärmer bleiben.

Von hier aus besteht eine interessante Beziehung und auch ein gewisser Rückkopplungseffekt zur Verteilung des Obstbaues in den beiden unterschiedlichen Ackerbaulandschaften. Bei den Dörfern auf der Niederterrasse des Rheins ist der Obstbau auf die Hausgärten und die dorfnahen Äcker konzentriert. In den Gäulandschaften, wo es insgesamt wesentlich weniger Obstbau gibt, meiden die Obstbäume die tiefsten Bereiche der Mulden und damit auch häufig die Ortsnähe.



a) HCMM-Daten (grau) und Siedlungsstruktur (schwarz)

1 Wuhl 2 Weisweil 3 Forchheim

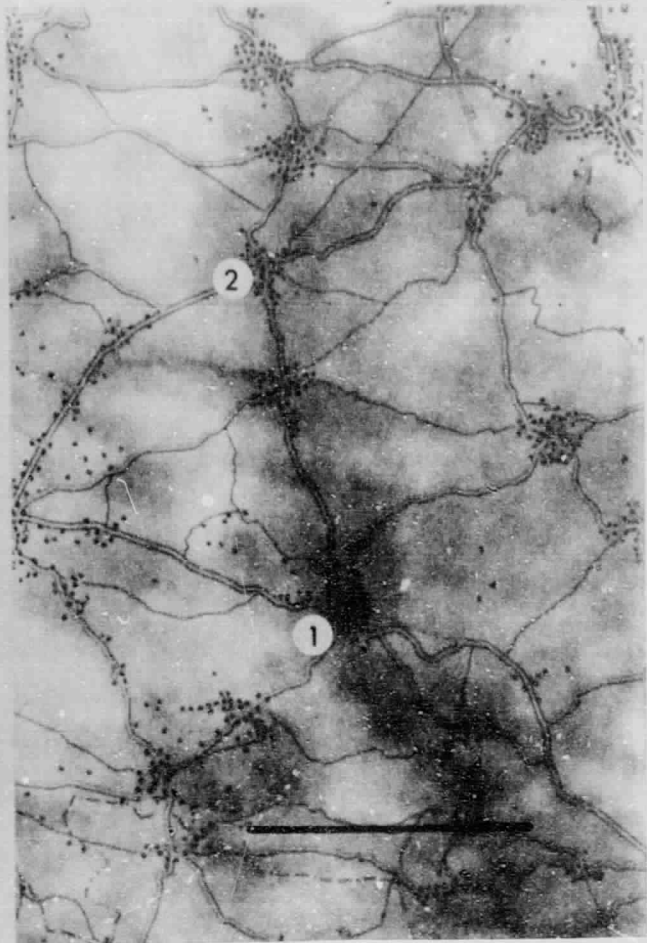


b) W-O-Profil

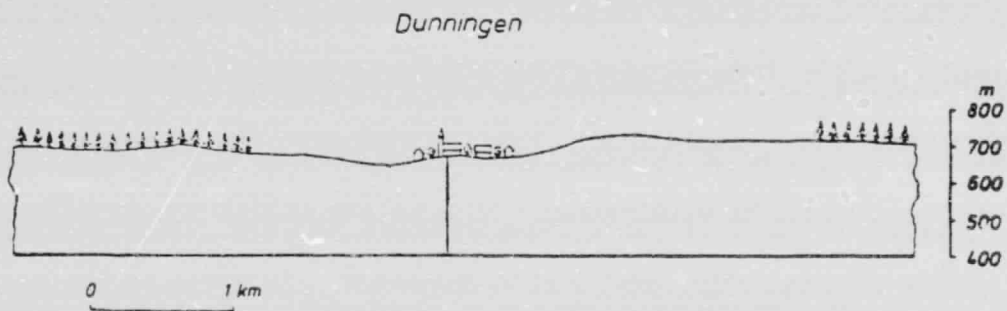
Abb. 17: Forchheimer Niederterrassenplatte



a) Übersicht mit Wald und Siedlungen



b) Ausschnitt, HCMH-Daten (grau) und Siedlungen (schwarz).
1 Dunningen
2 Waldmössingen



c) Geländeprofil

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

Abb. 18: Eschachtal im Oberen Gäu

3.11 Kinzigtal und Murgtal im Nordschwarzwald (Abb. 19 u. 20)

In der Übersichtsaufnahme von Abb. 1 sind das Kinzigtal und das Murgtal im nördlichen Schwarzwald die markantesten und mit dem größten Detailreichtum abgebildeten Talsysteme in allen die Oberrheinebene umgebenden Mittelgebirge. Deshalb sollte man diese Einzelfallbetrachtungen nicht schließen, ohne beide Ausschnitte in ihren Einzelheiten anhand von Vergrößerungen vorgestellt zu haben.

In beiden Fällen - sowohl beim unteren Kinzigtal (Abb. 19) als auch im oberen Murgtal (Abb. 20) - wird das Bild beherrscht vom Gegensatz zwischen der breiten, waldfreien Talsohle und den sie umgebenden steilen Hängen und hohen Bergzügen. Der Talgrund ist jeweils um $4 - 6^{\circ}\text{C}$ kälter als die benachbarten Höhen. Die Berge des Schwarzwaldrandes nördlich und südlich vom Ausgang des Kinzigtales sind bis zu 14° warm, der Talgrund liegt etwa bei 9°C . Bei einem Querprofil durch das Murgtal reicht die Temperaturspanne von 6°C im Tal bis zu 11°C auf den Bergen zu beiden Seiten. Beide Täler sind Beispiele für die Superposition des hier gleichgerichteten Einflusses von Relief und Waldverteilung auf das Muster der Oberflächentemperaturen.

Neben dieser jeweils dominierenden Struktur gibt es aber in beiden Abbildungen noch eine Reihe weiterer beachtenswerter Fakten:

1) Die besonders stark verfirsteten Bereiche des Schwarzwaldrandes nahe der Oberrheinebene sind wärmer als die weiter östlich anschließenden Höhen. In Abb. 19 sind das vor allem die Berge auf beiden Seiten des untersten Kinzigtales, in Abb. 20 die nach Baden-Baden zu abdachenden Höhen in der linken oberen und die nach SW zum Renchtal hin einfallenden Gebiete an der linken unteren Bildecke. Die um $1 - 2^{\circ}$ geringeren Oberflächentemperaturen sind vor allem auf den Restflächen der Buntsandsteinhöhen vertreten.

2) Östlich des Murgtales (Abb. 20) werden auch auf den Hochflächen sehr tiefe Oberflächentemperaturen erreicht ($6 - 8^{\circ}\text{C}$), und zwar in den Rodunginseln der Enz-Nagold-Platte am rechten Bildrand und insbesondere im Rodungsgebiet des sogenannten Freudenstädter Grabens an der rechten unteren Bildecke. Im Be-

reich dieses Freudenstädter Grabens springt von SO her das Gäuland gegen den Schwarzwald vor, weil hier auf einer etwa 8 km breiten und ca. 50 - 100m tief abgesenkten Scholle unter der tertiären Abtragungsfläche Muschelkalk erhalten geblieben ist. Die Wälder, die den Freudenstädter Graben hufeisenförmig umrahmen, stehen auf Buntsandstein, die waldfreie Fläche ist größtenteils im unteren und mittleren Muschelkalk ausgebildet. Die höchsten Flächenreste des Muschelkalkes liegen in einem Höhenniveau mit den nach NO und SW anschließenden Buntsandsteinflächen in der allgemeinen Abdachung dieses Raumes nach SO. Der Temperaturunterschied von 2 - 3°C zwischen den Wäldern auf dem Buntsandstein und den Acker- und Grünlandflächen des Freudenstädter Grabens steht damit stellvertretend für den entsprechenden Temperatursprung längs der gesamten Grenze zwischen Schwarzwald und Gäuland.

In dieser insgesamt kälteren Fläche an der SO-Ecke des Bildes ist wieder eine Differenzierung nach Relief und Siedlungsmuster zu erkennen. So ist das Tal der Glatt und ihrer Nebenbäche besonders kalt, während Freudenstadt und das große Dorf Dornstetten (jeweils etwa 1 cm vom unteren Bildrand entfernt) durch helle Flecken vertreten sind.

3) An der rechten oberen Ecke von Abb. 20a und 20b erkennt man sowohl das weitgehend bewaldete Tal der großen Enz (6 - 8°C) als auch die auf der Buntsandsteinhochfläche zwischen Enz und Murg liegenden Hochmoorgebiete am Hohloh- und am Wildsee (8 - 9°C), die als kühl abgebildet werden.

4) In dem auf Abb. 19 angeschnittenen Teil der Oberrheinebene bei Offenburg sind auffällig:

- a) die Wärmeinsel der Städte Offenburg und Lahr,
- b) die tiefen Oberflächentemperaturen der Waldgebiete östlich und nördlich von Offenburg.

5) Im Murgtal selbst fällt der Gegensatz zwischen dem oberen und dem unteren Murgtal unterhalb der Enge von Forbach auf. Die hohen Temperaturen unterhalb von Forbach können verschiedene Gründe haben. Zum einen hat das Tal hier einen völlig anderen Charakter als das des Oberlaufs. Es ist tief, fast

schluchtartig in das Grundgebirge eingeschnitten und hat nur an ganz wenigen Stellen eine schmale Talsohle. Ferner wird es auf dieser Strecke durchgehend von Siedlungen auf den Hang-
leisten begleitet. Außerdem sind in diesem Abschnitt mehrere Papierfabriken. Die HCMM-Daten können hier dadurch beeinflusst sein, daß die sich bei Strahlungswetter in der Nacht ausbildende Inversion sehr häufig zu einer kräftigen Dunstanreicherung in diesem Talabschnitt führt.



a) Wald, Gewässer
und Relief

- 1 Kinzigtal
- 2 Schuttertal
- 3 Renchtal
- 4 Offenburg (50 000 Ew)
- 5 Lahr (35 000 Ew)



b) Relief und Gewässer

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

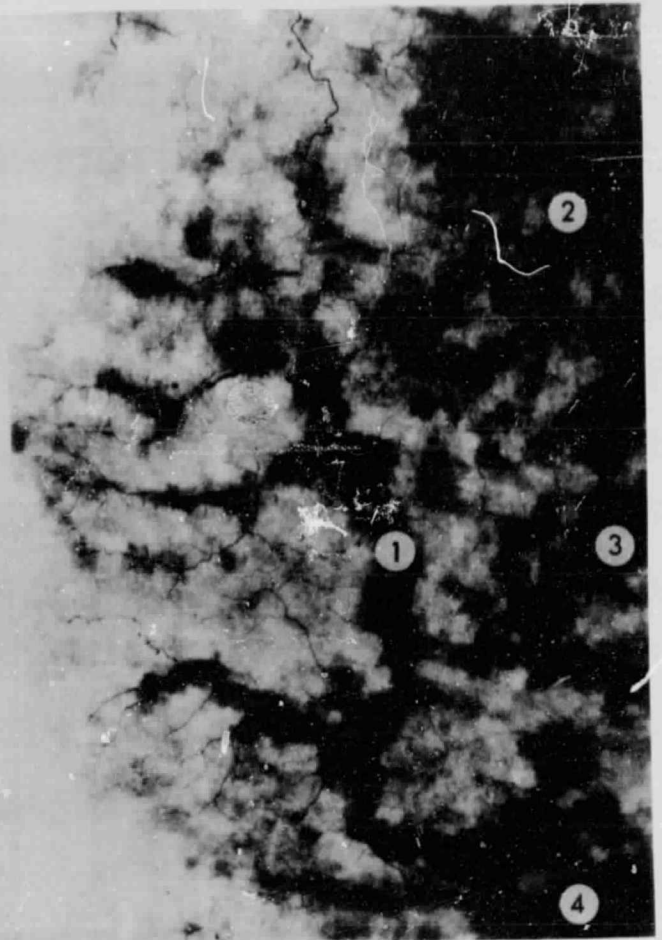
Abb. 19: Kinzigtal und
Schwarzwaldrand bei Offenburg

Grau: HCMM-Daten (hell = warm,
dunkel = kalt)

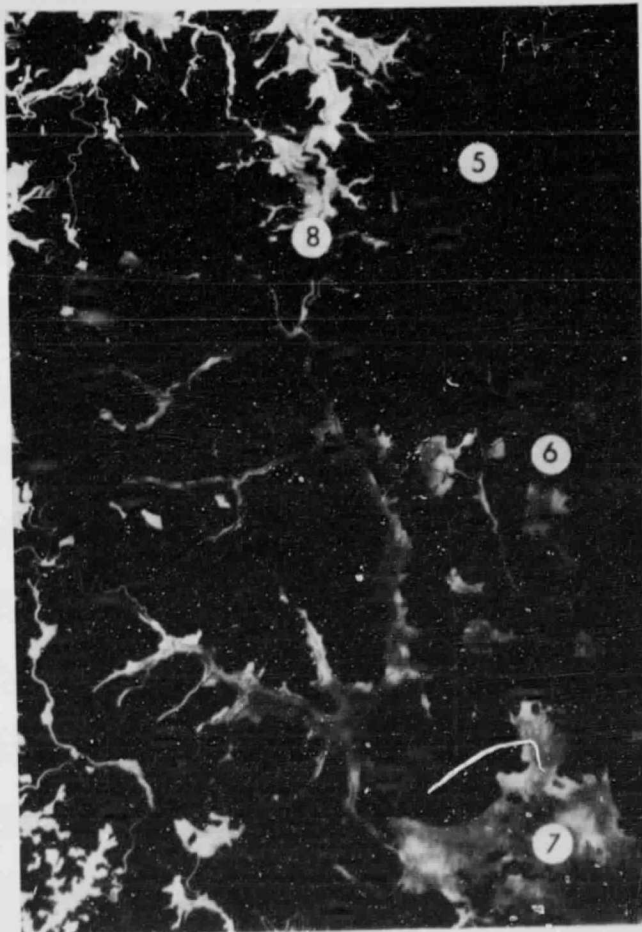
Schwarz: Auszüge aus der
TÜK 200, Blatt CC 7910



a) Relief und Gewässer



b) Gewässer



- 1 Murg
- 2 Große Enz
- 3 Nagold
- 4 Glatt
- 5 Murg-Enz-Platte
- 6 Enz-Nagold-Platte
- 7 Freudenstädter Graben
- 8 Enge von Forbach

Abb. 20: Murgtal im
Nordschwarzwald

Grau: HCMM-Daten (hell = warm,
dunkel = kalt)
Schwarz: Auszüge aus der
TÜK 200, Blatt CC 7910

4 Ergebnisse und Zusammenfassung

4.1 Geometrische Auflösung und adäquate Kartenmaßstäbe

Geht man von einem Minstdurchmesser flächenhafter Signaturen in thematischen und topographischen Karten von 0,3 mm aus, so entspricht die geometrische Auflösung des VHRR (Very High Resolution Radiometer) des HCMM von 600 m dem Kartenmaßstab 1 : 2 000 000. Das bedeutet, daß es möglich ist, alle in den HCMM-Aufnahmen enthaltenen Informationen in diesem Maßstab darzustellen, und daß alle in der HCMM-Aufnahme enthaltenen topographischen Strukturen auch in den entsprechenden Karten dieses Maßstabes zu finden sein müßten. Aus diesem Grunde war zunächst Skepsis angebracht, ob die Vergrößerung auf den Maßstab der Topographischen Übersichtskarte 1 : 200 000 und die Überlagerung des vergrößerten Bildes mit den verschiedenen Informationsebenen dieser Karte überhaupt einen Erkenntniszuwachs bringen würde.

Das hier vorgelegte Material zeigt meines Erachtens jedoch eindeutig, daß in den HCMM-Daten eine große Fülle von Informationen steckt, die erst bei diesem Arbeitsschritt sichtbar gemacht werden können. Dies gilt insbesondere für die Verknüpfung zwischen den Oberflächentemperaturen und dem Gewässernetz (vgl. Abb. 10a, 16c und 20b) sowie für die Beziehung der Oberflächentemperaturen zum Siedlungsmuster (vgl. Abb. 17a und 18a).

Dabei sollte man als selbstverständlich festhalten, daß die Auflösung des HCMM natürlich in der Regel nicht dazu ausreicht, um in Karten dieses Maßstabes Grenzlinien verschiedener räumlicher Einheiten festzulegen oder die Grenzen topographischer Strukturen aus dem HCMM-Bild heraus zu bestimmen. Dies zeigt besonders deutlich der Vergleich der Flugzeugthermalaufnahme in Abb. 16e mit den entsprechenden Ausschnitten in den Abbildungen 16a, b, c und d.

Wesentlich ist, daß das thermische Muster des HCMM-Bildes auf diese Weise der topographischen Struktur zugeordnet und aus dieser erklärt werden kann. Damit ist es möglich, für verschiede-

dene räumliche Einheiten, deren Grenzen aus der Karte übernommen werden, Aussagen über das thermale Verhalten aus den HCMM-Daten abzuleiten.

Dieser Gesichtspunkt wird in einem späteren Bericht über die nächtlichen Oberflächentemperaturen der verschiedenen naturräumlichen Einheiten Südwestdeutschlands wieder aufgegriffen werden. Die anhand der Beispiele erarbeiteten und im folgenden zusammengefaßten Gesetzmäßigkeiten bieten hierfür eine anschauliche Grundlage.

4.2 Nächtliche Oberflächentemperaturen und Relief

Die HCMM-Aufnahme gestattet, die aus der Geländeklimatologie bekannten Muster der nächtlichen Oberflächentemperaturverteilung im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit bei einer regionalen Betrachtung zu überprüfen.

Das bekannteste solche Schema ist die thermische Dreigliederung reliefierten Geländes bei Nacht in kalte Hochflächen und Gipfel, warme Hangzonen und kalte Tallagen, die für Strahlungswetterlagen in zahlreichen Beispielen belegt ist und mit einer Vielzahl phänologischer Erscheinungen in Beziehung gesetzt wird (vgl. GEIGER S.451-463).

Man sollte annehmen, daß ein so grundlegendes und so häufig bestätigtes Gesetz auch die Verteilung der Oberflächentemperatur in den hier erfaßten Mittelgebirgen bestimmen müßte. Allgemeine Bestätigung findet in dem vorgelegten Material jedoch nur der Gegensatz zwischen kalten Tallagen und Niederungen auf der einen sowie warmen Hängen und Hochlagen auf der anderen Seite. Die Tallagen sind bei einheitlicher Oberflächenbedeckung überall wesentlich kälter als die Hanglagen. Das Muster der den Tiefenlinien folgenden Gewässer ist nahezu hundertprozentig kongruent mit dem Verbreitungsmuster besonders kalter Oberflächen (vgl. Abb. 20b). Das gilt nicht nur für die oft einige 100m tief eingeschnittenen Täler in den Mittelgebirgen, sondern auch für Höhendifferenzen bis zu weniger als 1m auf den Schotterflächen der Oberrheinebene (vgl. Abb. 10a und 16c).

Demgegenüber sind in den meisten der vorgestellten Bildaus-schnitte die Hochlagen genauso warm wie die Hänge, bei einigen sogar deutlich wärmer (Soonwald, Pfälzer Wald, Westtaunus, Schwarzwaldrand bei Offenburg). Kalte Hochlagen finden sich in den Beispielen nur, wo mindestens eine der drei folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- 1) Bei Wiesen- oder Ackerflächen in den Hochlagen über bewaldeten Hängen (am Feldberg und Belchen im Schwarzwald, bei Hofgrund am Schauinsland, in den hochgelegenen Rodungsiseln im Taunus oder auf der Enz-Nagold-Platte).
- 2) Bei ausgedehnten ebenen Hochflächen (vgl. Abb. 20a, bewaldete Buntsandsteinhochflächen auf der Murg-Enz-Platte).
- 3) Bei insgesamt geringer Reliefenergie und weitgespannten Hochflächen (vgl. Abb. 9b, Rheinhessisches Hügelland).

Wenn sich diese hohen Oberflächentemperaturen der Gipfellagen am Rande der Oberrheinebene bei anderen Aufnahmen bestätigen, so bedeutet dies, daß der spätere Frühlingseinzug auf den Gipfeln gegenüber den Hanglagen nicht aus der Verteilung der Nachttemperaturen bei Strahlungswetterlagen begründet werden kann, wie dies für den Großen Arber und den Falkenstein im Bayrischen Wald von BAUMGARTNER und anderen beschrieben wurde, sondern daß hierfür das allgemein niedrigere Temperaturniveau der Gipfellagen verantwortlich ist. Für die in denselben Arbeiten dargelegte Ableitung einer verzögerten phänologischen Entwicklung in manchen Tallagen aus der Verteilung der Nachttemperaturen gibt das bearbeitete Material dagegen eine volle Bestätigung.

Geht man nicht von einem einzelnen Tal oder Berg aus, sondern setzt großräumig die Oberrheinebene als "kalte Niederung", den gesamten direkt zur Oberrheinebene entwässernden, stark verfirsteten Randbereich der Mittelgebirge als "warme Hangzone" und die zum Bildrand abdachenden Hochflächen als "kalte Hochlage", so findet man in diesem regionalen Maßstab eine nahezu vollständige Kongruenz zwischen dem Modell und der Wirklichkeit.

4.3 Oberflächentemperaturen und Waldverteilung

Es ist die allgemeine Auffassung, daß sich Wälder in der Nacht nicht so stark abkühlen wie Freiflächen und daß sie damit auch in der Nacht höhere Oberflächentemperaturen ausbilden als benachbarte Acker- oder Wiesenflächen. Deshalb überraschte es, daß die Auswertung des obigen Materials in diesem Punkte ein wesentlich differenzierteres Bild ergab. Anhand der einzelnen Beispiele wurde folgendes festgestellt:

1) Sehr hohe Temperaturen (ebenso warm wie die Kernbereiche der Großstädte) haben Wälder auf steilen Hängen oder auf konvexen Geländeformen. Dazu gehören alle Wälder in den angesprochenen, stark verfirsteten Randbereichen der Mittelgebirge zur Oberrheinebene hin, aber auch der hohe Kaiserstuhl, der Rand des Kraichgaues und der Anstieg des Spessarts in der Nordostecke von Abb. 1a.

2) Mit weniger hohen Oberflächentemperaturen, aber eindeutig wärmer als eingestreute Rodungseinseln und benachbarte Freiflächen erscheinen auch alle Wälder auf den Hochflächen der Mittelgebirge. Außerhalb der Oberrheinebene ist überall, wo nicht das Relief das thermale Muster bestimmt, der Gegensatz zwischen Wald und Freiflächen der wesentliche Faktor für die Verteilung kalter und warmer Oberflächen. Am deutlichsten wird dies auf der Ostseite des Schwarzwaldes mit dem Nebeneinander der relativ warmen Waldflächen und der kalten, nach Osten anschließenden Gäulandschaften.

3) Sehr komplex ist das Bild in der Oberrheinebene selbst. Als relativ warm werden die Auewaldreste am Rhein abgebildet, und zwar überall da, wo sie ihren Charakter als Auewald nicht durch die Kanalisierung des Rheins und die dadurch hervorgerufene Grundwasserabsenkung verloren haben. Etwas wärmer als ihre Umgebung erscheinen auch die Wälder auf den Schwemmfächern vor dem Pfälzer Wald und vor den Nordvogesen. Dagegen sind ebenso kalt oder sogar kälter als ihre Umgebung die meisten der Hardtwälder auf den Niederterrassenschottern des Rheins und zum Teil auf den Schotterfächern der Schwarzwald-

flüsse. Am deutlichsten ist dies in der südlichen Oberrheinebene nördlich von Basel.

Sieht man einmal von dem Verhalten der Auewaldreste am Rhein ab, so gilt ganz allgemein die Tendenz zu großem Kontrast zwischen Wäldern und waldfreien Flächen auf konvexen Geländeformen und zu einer Abschwächung des Kontrastes zwischen beiden Oberflächengattungen in konkaven Geländeformen. Die höchsten Oberflächentemperaturen treten, wie schon mehrfach festgestellt, auf bewaldeten Bergrücken und Steilhängen auf.

Für das unterschiedliche Verhalten der Oberflächen der Wälder muß es mehrere Gründe geben:

- 1) Die tiefen Oberflächentemperaturen der Hardtwälder werden nur verständlich, wenn man davon ausgeht, daß unter der in der Oberrheinebene vorhandenen Bodeninversion ein einigermaßen einheitliches Kaltluftpaket bis über die jeweilige Bestandshöhe hinaus existierte. Dies würde auch erklären, daß die Waldflächen im abgeschlossenen "Hof" der Freiburger Bucht besonders kalt erscheinen.
- 2) Das andersartige Verhalten der Wälder auf den Hochflächen ergäbe sich dann daraus, daß durch die größere dynamische Turbulenz infolge der größeren Windgeschwindigkeiten eine solche genügend mächtige Bodeninversion sich dort nicht bilden konnte, der fühlbare Wärmestrom zu den Waldoberflächen also größer blieb als auf den benachbarten Wiesen und Ackerflächen.
- 3) Zusammen bedeutet dies aber, daß die im allgemeinen höheren nächtlichen Oberflächentemperaturen der Wälder nicht oder zumindest nicht allein aus der Wärmekapazität des Stammraumes erklärt werden können, sondern daß vor allem der Wärmezufuß aus der den Wald überwehenden Luft zur Erklärung herangezogen werden muß. Man hat sich dabei zu vergegenwärtigen, daß eine höhere Temperatur der Waldflächen gleichzeitig eine größere negative Strahlungsbilanz und damit einen größeren Energieverlust im Strahlungshaushalt bedeutet, der vor allem durch den fühlbaren Wärmestrom von der Luft zur Waldoberfläche ausgeglichen werden muß.

4) Zur Erklärung der relativ hohen Temperaturen der Auewälder am Rhein müßte man davon ausgehen, daß einerseits durch die vielen Restwasserflächen ¹⁾ eine insgesamt größere verfügbare Wärmekapazität unterhalb der Waldoberfläche vorhanden ist und daß, ähnlich wie in den großen Städten (siehe unten) die Bodeninversion unterbrochen oder zumindest abgeschwächt ist.

5) Die besonders hohen Temperaturen des bewaldeten Mittelgebirgsreliefs am Rande der Oberrheinebene sind andererseits ein Beleg dafür, daß der vielfach bezweifelte Kaltluftabfluß im Stammraum eines Waldes, wie ihn zuletzt FEZER (1977, S.63) beschrieben hat, doch recht effektiv ist. Sonst wäre es schwer zu erklären, daß auch völlig bewaldete Täler wie das Speyerbachtal im Pfälzer Wald eine große Kaltluftansammlung und eine entsprechende Strömung talauswärts ausbilden.

4.4 Die Oberflächentemperaturen der Siedlungen

Es war zu erwarten, daß die Wärmeinseln der großen Städte wegen der höheren Oberflächentemperaturen in der HCM-Aufnahme abgebildet würden. Es hat sich aber gezeigt, daß auch wesentlich kleinere Siedlungen bei günstigen Bedingungen bis herunter zu etwa 2000 Einwohnern in der Aufnahme ein Signal erzeugen können.

Voraussetzungen hierfür sind, wie das Beispiel der Dörfer Wyhl und Forchheim zeigt, eine dichte Bebauung des Ortskernes (Haufendorf) und die Lage in einer horizontalen und waldfreien Umgebung, weil sonst durch andere Einflüsse auf das thermische Muster das schwache, von der Siedlung hervorgerufene Signal überdeckt wird. Insbesondere wird bei Dörfern dieser Größenordnung, die in einer Hohlform liegen, der thermische Effekt der Siedlung durch den entgegengesetzten Einfluß des Reliefs überspielt.

1) Die Restwasserflächen waren zum Aufnahmezeitpunkt besonders groß und zahlreich, da der Rhein wenige Tage vorher im Mai 1978 ein bedeutendes Hochwasser geführt hat.

Allerdings sind auch von den Dörfern mit den oben genannten günstigen Bedingungen bei weitem nicht alle durch einen hellen Punkt in der HCMM-Aufnahme repräsentiert. Dies liegt daran, daß es sich hier um Erscheinungen an der unteren Grenze sowohl der radiometrischen wie auch der geometrischen Auflösung handelt. Der Effekt liegt in derselben Größenordnung wie das Rauschen des VHRR. Deshalb kann in jedem Einzelfalle die Wärmeinsel eines Dorfes durch dieses Rauschen vorgetäuscht oder auch unterdrückt sein. Gleichzeitig hängt die Erfassung eines Dorfes davon ab, ob seine Fläche von einem Bildelement abgedeckt wird oder ob es anteilig auf mehrere Bildelemente verteilt ist. Nur im ersten Fall kann ein Signal im Thermalbild erwartet werden. Aus diesen Gründen sind die anhand von Abb. 17 und 18 abgeleiteten Ergebnisse nur deshalb gesichert, weil sie jeweils an einer größeren Zahl ähnlicher Fälle in gleicher Weise auftreten.

Eindeutiger ist die Situation bei sehr großen Dörfern und kleineren Städten von einer Größenordnung von etwa 10 000 Einwohnern an. So werden beispielsweise Endingen am Kaiserstuhl (ca. 6400 Ew) und Bad Krozingen (ca. 7800 Ew) aufgrund ihrer höheren Oberflächentemperaturen vom HCMM unzweifelhaft als Wärmeinseln erkannt. Bei Städten mit einigen zig-tausend Einwohnern wie Colmar, Lahr oder Offenburg ist in allen Fällen der Innenstadtbereich als Wärmeinsel um einige Grad höher als das Umland ausgewiesen.

Bei den Großstädten Mannheim/Ludwigshafen und Straßburg steigt diese Temperaturdifferenz zum Umland bis auf über 4°C an. Dabei ist der Bereich höherer Oberflächentemperaturen mit der Strömung der bodennahen Luft über die Grenze der städtisch bebauten Fläche hinaus ins Vorland verlängert. Der suburbane Raum ist jeweils auf der Leeseite der Stadt wesentlich wärmer als auf der Luvseite. An der Erzeugung dieses, meines Wissens auch bei Flugzeugthermalaufnahmen noch nicht beschriebenen Phänomens können zwei Vorgänge beteiligt sein:

- 1) Es ist möglich, daß über den großen Städten, teils durch die größere Rauigkeit der Oberfläche, teils durch die größe-

ren Oberflächentemperaturen die Bodeninversion aufgelöst oder zumindest abgeschwächt ist. Die Aufnahmen legen nahe, daß bei der gegebenen Wetterlage die neue Ausbildung der Bodeninversion im Lee der großen Städte nicht unmittelbar am Rande der dicht bebauten Zone erfolgt, sondern ein Stück in das Vorland hinaus verschoben wird.

2) Die großen Agglomerationen können, wie z.B. aus LANDSAT-Aufnahmen bekannt ist, durch ihre Emissionen eine Dunstanreicherung in der untersten Troposphäre hervorrufen. Dadurch würde auch in dem Wellenlängenbereich, in dem die HCMM-Aufnahmen erfolgen, Strahlung absorbiert und emittiert. Deshalb kann sowohl über den großen Städten als auch in ihrem Lee der Einfluß der Atmosphäre auf die HCMM-Daten größer sein als im emissionsärmeren Umland. So können in diesem Raum die HCMM-Daten zu den höheren Lufttemperaturen hin verschoben sein und auf diese Weise einen "Wärmehof" im Lee der großen Städte aufweisen.

4.5 Industrieareale

Die erwähnten Industrieareale zeigen, daß der unterschiedlich hohe Energieumsatz verschiedener Branchen im Thermalbild zum Ausdruck kommt, wenn es auch sicher nicht möglich ist, aus der unterschiedlichen Temperatur des Peugeot-Werkes bei Mulhouse und der chemischen Fabriken der BASF in Ludwigshafen und von Rhône-Poulenc bei Neuenburg die jeweilige Abwärmemenge quantitativ zu erfassen. Die Interpretation ist auch deshalb schwierig, weil allein anhand der Thermalaufnahme nicht entschieden werden kann, ob die vom HCMM registrierten hohen Temperaturen der Chemiewerke tatsächlich höhere Oberflächentemperaturen sind oder ob sie auf den maskierenden Einfluß wärmerer, aerosolhaltiger Abgase zurückgeführt werden müssen.

4.6 Kaltluftammelbecken und Kaltluftfluß

Zum Problem der Kaltluftansammlungen in Hohlformen und des Kaltluftabflusses aus Tälern ergeben sich folgende Aussagen:

1) Die Tatsache, daß unabhängig von der Oberflächenbedeckung im allgemeinen Talweitungen als kalt abgebildet werden, spricht dafür, daß das Thermalbild hier die Geländebereiche erfaßt, in denen sich nachts Kaltluft sammelt und entweder stagniert oder mit nur geringer Geschwindigkeit talabwärts weiterfließt, während andererseits mit den Engtalstrecken die Talabschnitte warm erscheinen, in denen Kaltluft zügig abfließt. Hinzu kommt, daß im Gegensatz zu den Kaltluftammelgebieten nirgendwo die Bereiche vor den Talausgängen als besonders kalt erfaßt wurden. Zusammen heißt dies, daß im Satellitenthalbild zwar die Kaltluftammelbecken dargestellt werden, nicht aber die Kaltluftzugbahnen und die Kaltluftzungen am Ausgang der Täler.

2) Es ist eine verbreitete Ansicht, daß hochgelegene Wiesenflächen die wesentlichen Quellen der Kaltluftproduktion und damit eine Voraussetzung für die nächtlichen Kaltluftströme am Talausgang seien, weil die Wiesen kälter werden als die benachbarten Wälder. So wird auch die Wirksamkeit des Höllentälers bei Freiburg nicht nur mit seinem großen Einzugsgebiet sondern auch mit der Verbreitung von Wiesen in den Hochlagen am Schauinsland und den Ausläufern des Feldbergs in Zusammenhang gebracht. Wie die Beispiele des Speyerbaches und des Wispertales zeigen, können jedoch auch vollständig oder weitgehend bewaldete Einzugsbereiche ebenso ein Kaltluftreservoir darstellen. Diese Feststellung war im Grunde naheliegend. Müssen doch vom Wärmehaushalt her gesehen die hochgelegenen Waldflächen bei ihren höheren Oberflächentemperaturen eine größere Ausstrahlung und damit ein größeres Energiedefizit im Strahlungshaushalt haben als benachbarte Wiesen. Demzufolge müssen die Wälder auch der Luft über den fühlbaren Wärmestrom eine größere Energiemenge entziehen und somit einen größeren Beitrag zur Abkühlung von Luft leisten. Im Vergleich zu Wiesen

in entsprechender Lage produzieren Wälder nicht so stark abgekühlte Luft, diese aber dafür in größerer Menge.

4.7 Vergleich der Verwendungsmöglichkeiten von Flugzeug- thermalaufnahmen und Satellitendaten

Die Arbeit mit Satellitenthermaltbildern böte gegenüber dem Einsatz von Flugzeugaufnahmen mehrere Vorteile. Neben den hohen Kosten für das Flugzeug ist bei den Satellitendaten auch die geometrische Entzerrung und damit die digitale Überlagerung mit anderen Informationsschichten wesentlich einfacher. Vor allem aber spricht die Möglichkeit, große Gebiete nahezu gleichzeitig zu erfassen, für die Bevorzugung der Satellitenthermaltbilder. Die Aufnahme eines Gebietes von der Größe der Oberrheinebene würde mit den gegenwärtig für die zivile Forschung verfügbaren Flugzeugen Stunden erfordern und also Material ergeben, das mit erheblichen, durch den Aufnahmezeitraum bedingten Inhomogenitäten belastet wäre. Deshalb lohnt es sich zu fragen, inwieweit Flugzeugthermalaufnahmen durch Satellitendaten ersetzt werden können.

Naturgemäß können die Satellitendaten nicht verwendet werden, wenn es darum geht, Flächen unterschiedlichen thermischen Verhaltens mit einer Genauigkeit von weniger als 600 m gegeneinander abzugrenzen, wie dies z.B. bei den bekannten Terrassenuntersuchungen im Weinbaugebiet des Kaiserstuhles oder auch bei den Vergleichen des thermischen Verhaltens verschiedener Baukörper oder Baugebiete in Stadtgebieten nötig ist. Bei allen Untersuchungen aber, die einen Überblick über das thermische Muster innerhalb von Flächen von 10 x 10 km oder mehr erfordern, ergeben die Satellitendaten dasselbe Bild wie eine Flugzeugaufnahme bei entsprechender Mittelung (vgl. Abb. 15), vorausgesetzt, daß man in der Umgebung der zu untersuchenden Fläche mit genügender Genauigkeit Paßpunkte für die geometrische Eindordnung festlegen kann. Dies ist in reliefiertem Gelände im allgemeinen kein Problem. Für solche, aus der lokalen in die regionale Betrachtung hinüberführende Untersuchungen

sind die Satellitendaten sogar wesentlich anschaulicher als das Flugzeugthermalbild, da dieses durch die vielen dargestellten topographischen Einzelheiten die wesentlichen Beziehungen im thermischen Muster oft verdeckt. Insbesondere die Abhängigkeit der Oberflächentemperatur vom Relief wird meines Erachtens in der HCMM-Aufnahme wesentlich klarer als in vergleichbaren Flugzeugaufnahmen.

Literatur:

- (1) BOHSE, J.R., BEWTRA, M. and BARNES, W.L.: Heat Capacity Mapping Radiometer (HCMR). Data Processing Algorithm, Calibration, and Flight Performance Evaluation. NASA, Technical Memorandum 80 258, April 1979.
- (2) GOSSMANN, H. u. HABERÄCKER, P.: Image processing of HCMM-satellite thermal images for superposition with other satellite imagery and topographic and thematic maps. TELLUS-Newsletter Nr.12, Ispra 1980.
- (3) GOSSMANN, H.: Zur Kalibrierung der HCMM-Aufnahme vom 30. 5. 78, 2.13 GMT. Unveröffentlichtes Manuskript, 4 Seiten.
- (4) BLÜTHGEN, J.: Allgemeine Klimageographie. 2. Auflage, Berlin 1966.
- (5) GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. 4. Auflage, Braunschweig 1960.
- (6) VOGT, G., SEITZ, R. u. FEZER, F.: Lokalwinde im Pfälzer Wald und Odenwald. in: Klimatologische Studien im Rhein-Neckar-Raum, Heidelberger Geographische Arbeiten, 47, 1977, S.60-85.